

N° d'ordre :

École Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur

ULP – INSA – ENGEES - URS

THÈSE

présentée pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Louis Pasteur – Strasbourg I

Discipline : Sciences pour l'Ingénieur

(spécialité Sciences et Technologies Industrielles)

par

François GEISKOPF

**Formalisation et exploitation des contraintes Produit/Process
pour la conception de systèmes de production ; application à
l'Usinage Grande Vitesse**

Soutenue publiquement le 03 décembre 2004

Membres du jury

<i>Président du jury :</i>	M. AHZI, professeur, ULP de Strasbourg
<i>Rapporteur externe :</i>	M. HASCOET, Professeur, EC Nantes
<i>Rapporteur externe :</i>	M. GIRARD, HDR, IUFM de Bordeaux
<i>Directeur de thèse :</i>	M. CAILLAUD, professeur, ULP de Strasbourg
<i>Co-Directeur de thèse :</i>	M. VILLENEUVE, professeur, INP Grenoble
<i>Examineur :</i>	M. KIEFER, MdC, INSA de Strasbourg
<i>Membre invité :</i>	M. ULRICH, ingénieur, société SEW USOCOME
<i>Membre invité :</i>	M. WALTER, professeur agrégé, PFP Alsace UGV
<i>Membre invité :</i>	M. HAIECH, professeur, ULP de Strasbourg

« Il ne faut pas faire l'un trop vite »

Platon

Remerciements

Je tiens à remercier Messieurs Hascoet, Girard et Ahzi d'avoir accepté de rapporter mon mémoire de thèse.

Je remercie François Villeneuve et Roland de Guio d'avoir accepté la co-direction initiale de ma thèse, en 1999, dans des conditions relativement difficiles.

Je remercie Madame Creton, M. Mille et les membres du conseil scientifique de l'INSA de Strasbourg pour avoir eu confiance en notre projet de recherche. En m'ayant accordé un aménagement de mon service d'enseignement à deux reprises, ils m'ont fourni des conditions sans lesquelles ce travail n'aurait pu aboutir.

Merci à Messieurs Ulrich et Deutschmann du site SEW-USOCOME de Haguenau. Leur ouverture à des méthodes de conception inhabituelles dans le domaine nous a permis de confronter nos concepts au contexte industriel. Je remercie également les techniciens et opérateurs du secteur PF1, ayant intervenu dans le cadre du groupe de travail. Merci aux élèves ingénieurs ayant contribué plus ou moins directement à la finalisation de l'étude industrielle.

Merci à la Plate-Forme Productique Alsace UGV, pour les moyens mis à disposition aussi bien à l'INSA qu'au lycée Heinrich. Je tiens à remercier Luc Walter pour l'expertise technique qu'il a apporté lors de l'étude, et pour avoir accepté d'être membre invité du jury de cette thèse.

Merci à monsieur Haiech pour avoir accepté d'être membre invité du jury de cette thèse. J'espère que de futures collaborations seront maintenant envisageables.

Merci à Emmanuel Caillaud pour son suivi et sa disponibilité.

Merci à F. Kiefer pour la cohérence de l'ensemble de la thèse et pour l'expérience qu'il a su me faire partager.

Merci aux collègues de l'INSA : Laurence, Olivier, Marc, Virginie, Gilbert...

Merci à Pia et Henri...

Merci à Émilie pour m'avoir soutenu toutes ces années.

SOMMAIRE

Index des Figures.....	12
Index des Tableaux.....	15
Introduction.....	17
1) Problématique industrielle.....	17
2) Positionnement, Objectifs et contributions.....	17
Chapitre 1 : Modélisation des systèmes de production et du procédé d'Usinage Grande Vitesse.....	21
1) Modélisation des systèmes opérationnels de production.....	21
1.1) Notions fondamentales.....	21
a) Description d'un système de production.....	21
b) Changement du système.....	22
1.2) Modélisation des systèmes physiques de production.....	23
1.2.1) Modélisation de la structure des Systèmes de production.....	23
1.2.2) Modélisation des activités d'un système de production.....	27
a) Définition.....	27
b) Composants génériques.....	28
c) Fonctions génériques.....	28
d) Exemple de modèle par activités.....	28
1.2.3) Modélisation de l'évolution des systèmes physiques de production... 29	
1.2.3.1) Évolution et transformation.....	30
1.2.3.2) Compréhension du changement.....	30
a) Vision systémique de l'évolution.....	30
b) Lois d'évolution.....	31
c) Synthèse de la modélisation de l'évolution.....	32
1.3) Synthèse des systèmes opérationnels de production.....	33
1.4) Proposition de modèle.....	33
1.4.1) Modèle de référence de TRIZ.....	34
1.4.2) Éléments processés - processeurs - processus.....	36
1.4.2.1) Analyse des [Processus – Ressource – Produit].....	36
a) Système de production opérationnel (Niveau 4).....	37
b) Premier sous-système (Niveau 3).....	37
c) Deuxième sous-système (Niveau 2).....	38
d) Troisième sous-système (Niveau 1).....	39
1.4.2.2) Systémographie.....	40
1.4.3) Lien structure – fonction.....	40
1.4.4) Modèle des Systèmes Opérationnels de Production (MSOP).....	43
1.4.5) Conclusion sur le modèle.....	45
a) Limites.....	45
b) Apports.....	45
2) Impacts de l'UGV sur le système de production.....	46
2.1) Synthèse des processus et de leurs environnements.....	46
2.2) Le procédé UGV.....	48
2.2.1) Vue par les processus : l'enlèvement de matière.....	48

2.2.1.1) Coupe orthogonale.....	49
2.2.1.2) Zones de cisaillement en coupe conventionnelle.....	50
2.2.1.3) Discontinuités au sein du copeau lors de sa formation en UGV..	51
2.2.1.4) Limites de la vue processus.....	54
2.2.2) Vue système : stabilité de l'usinage.....	55
2.3) Impacts sur les produits et les ressources.....	57
2.3.1) Qualité des produits.....	58
2.3.1.1) Critères de qualité du produit.....	58
2.3.1.2) Exemple d'une pièce en fonte.....	62
a) Qualité du copeau.....	63
b) Qualité des surfaces.....	64
c) Qualité des pièces.....	66
d) Qualité des lots.....	67
2.3.1.3) Conclusion.....	67
2.3.2) Conséquences sur les ressources.....	68
2.3.2.1) Aspects techniques : surveillance des ressources.....	68
a) Surveillance hors usinage de l'arête de coupe.....	69
b) Surveillance pendant l'usinage.....	71
2.3.2.2) Adaptation aux changements d'environnement.....	73
2.3.2.3) Généralisation.....	75
2.4) Conséquences managériales.....	76
2.4.1) Impacts stratégiques de la technologie.....	76
2.4.1.1) Stratégie concurrentielle.....	76
2.4.1.2) Critères influencés par la technologie.....	77
2.4.2) Conséquences sur les ressources humaines.....	79
2.4.2.1) Formation.....	79
2.4.2.2) Ressources et Compétences.....	79
3) Conclusion.....	80
Chapitre 2 : Conception des systèmes de production.....	83
1) Besoins méthodologiques.....	83
1.1) Objectifs stratégiques et opérationnels.....	83
1.1.1) État de l'art.....	83
1.1.2) Formulation des objectifs.....	86
1.2) Cycle de vie des ressources.....	87
1.2.1) Phases du cycle de vie des ressources.....	87
1.2.2) Avant-projet et projet	91
1.3) Conception intégrée.....	93
1.3.1) Conception et pluridisciplinarité.....	93
1.3.2) Conception intégrée de systèmes de production.....	95
1.3.2.1) Disciplines concernées.....	95
1.3.2.2) Outils de communication.....	97
1.4) Synthèse des besoins.....	98
2) Approches existantes en avant-projet.....	99
2.1) Ressources partagées en avant-projet.....	99
2.1.1) Contexte de la modélisation d'entreprise.....	100
2.1.2) Discussions autour des dysfonctionnements.....	101
2.2) Méthodes pour l'évolution des systèmes de production	102
2.3) Aspects économiques en avant-projet.....	104
2.3.1) Contextes d'utilisation d'études de coûts.....	105

2.3.1.1) Une mesure de performance.....	105
2.3.1.2) Une ressource partagée de communication.....	106
2.3.2) Estimation des coûts du Cycle de Vie (Life Cycle Costing Assessment LCCA).....	107
2.3.3) Décision d'Investissements en moyens de production.....	111
2.4) Conclusion.....	113
3) Synthèse méthodologique.....	114
3.1) Vision économique du système usinant cible.....	115
3.1.1) Diagramme générique.....	116
3.1.2) Modèle analytique.....	118
3.2) Modélisation UML.....	119
3.3) Complexité du système usinant et des problèmes.....	122
4) Conclusion.....	123
Chapitre 3 : Méthode de conception du système usinant.....	125
1) Proposition d'une méthode de conception.....	125
1.1) Cycle d'abstraction de la méthode.....	125
1.1.1) Cycle d'abstraction classique.....	126
1.1.2) Architecture d'un système de production.....	126
1.1.3) Cycle d'abstraction d'un processus de conception pluridisciplinaire.....	129
1.2) Modèles génériques.....	130
2) Problèmes et contradictions.....	131
2.1) Compromis en méthodes de fabrication.....	132
2.2) Formalisme OTSM-TRIZ.....	134
2.2.1) Cycle d'abstraction d'OTSM-TRIZ.....	136
2.2.2) Contradictions du concepteur et d'évolution.....	137
2.2.3) Contradictions du système.....	138
2.2.3.1) Description informelle.....	138
2.2.3.2) Description formelle.....	139
3) Construction du modèle de problèmes.....	141
3.1) Problèmes et connaissances en UGV.....	141
3.2) Description des problèmes.....	143
3.2.1) Performances du système de production.....	144
3.2.1.1) Contexte.....	144
3.2.1.2) Contradictions d'évolution du système.....	145
a) Assurer le Retour sur investissement à long terme.....	145
b) Faire des Produits de Qualité.....	147
c) Faire une Diversité de produits.....	148
3.2.2) Contradictions du système.....	150
3.2.3) Assurer le Retour sur investissement à long Terme.....	152
3.2.3.1) Représentation graphique.....	152
3.2.3.2) Décomposition de l'élément Inflows.....	152
a) Définition des paramètres	152
b) Déclinaison des paramètres 1.1 et 1.2.....	153
c) Illustration de la Contradiction technique.....	153
d) Définition du paramètre X1.....	153
e) Contradiction physique.....	154
f) Déclinaison de la contradiction physique.....	154
3.2.3.3) Décomposition de l'élément Outflows.....	155
a) Définition des paramètres.....	155

b) Déclinaison des paramètres 2.1 et 2.2.....	155
c) Illustration de la contradiction technique.....	156
d) Définition du paramètre X2.....	156
e) Contradiction physique.....	156
f) Déclinaison de la contradiction physique.....	157
3.2.4) Faire des produits de Qualité.....	157
3.2.4.1) Représentation graphique.....	157
3.2.4.2) Décomposition de l'élément Délai.....	158
a) Définition des paramètres.....	158
b) Déclinaison des paramètres 3.1 et 3.2.....	158
c) Illustration de la contradiction technique.....	159
d) Définition du paramètre X3.....	159
e) Contradiction physique.....	160
f) Déclinaison de la contradiction physique.....	160
3.2.4.3) Décomposition de l'élément Précision.....	161
a) Définition des paramètres.....	161
b) Déclinaison des paramètres 4.1 et 4.2.....	162
c) Illustration de la contradiction technique.....	162
d) Définition du paramètre X4.....	162
e) Contradiction physique.....	162
3.2.5) Faire une Diversité de produits.....	163
3.2.5.1) Représentation graphique.....	163
3.2.5.2) Décomposition de l'élément Flexibilité.....	163
a) Définition des paramètres.....	163
b) Déclinaison des paramètres 5.1 et 5.2.....	164
c) Illustration de la contradiction technique.....	164
d) Définition du paramètre X5.....	165
e) Contradiction physique.....	165
f) Déclinaison de la contradiction physique.....	165
3.2.5.3) Décomposition de l'élément Réactivité.....	166
a) Définition des paramètres	166
b) Déclinaison des paramètres 6.1 et 6.2.....	167
c) Illustration de la contradiction technique.....	167
d) Définition du paramètre X6.....	167
e) Contradiction physique.....	167
4) L'UGV une solution à quels problèmes ?.....	168
4.1) Synthèse du modèle de problèmes.....	168
4.2) Reformulation des objectifs.....	169
4.3) Résolution des contradictions physiques.....	170
4.3.1) Cas général.....	170
4.3.2) Application à l'UGV en mécanique générale.....	173
4.3.2.1) Qualité des produits.....	173
4.3.2.2) Diversité des produits.....	174
4.3.2.3) Retour sur investissement.....	175
5) Conclusion.....	176
Chapitre 4 : Démarche de conception et cas d'étude.....	179
1) Introduction.....	179
1.1) Contexte industriel.....	179
1.2) Origines et cadrage initial du projet.....	180
2) Vue dynamique de PIA.....	181
2.1) Description détaillée de la méthode PIA.....	181
2.2) Phase 1 : Reformulation des problèmes.....	183

2.2.1) Initialisation (1a).....	183
2.2.2) Expression initiale des problèmes (1b).....	184
2.2.3) Classement initial des problèmes (1c).....	185
2.2.4) Validation des problèmes initiaux (1d).....	187
2.2.5) Synthèse de la phase 1.....	187
2.3) Phase 2 : Formalisation des contradictions techniques.....	188
2.3.1) Localisation des causes du problème (2e).....	188
2.3.2) Consolidation des formulations (2f).....	190
2.3.3) Synthèse de la Phase 2.....	192
2.4) Phase 3 : Détermination d'un sous-ensemble représentatif.....	193
2.4.1) Sélection des produits représentatifs (3g).....	194
2.4.2) Limitation du sous-ensemble représentatif (3h).....	194
2.5) Phase 4 : Identification d'une architecture cible.....	196
2.5.1) Balisage du domaine de recherche d'architecture (4i).....	196
2.5.2) Consolidation du cahier des charges de l'architecture cible (4j).....	198
2.5.3) Conception de la (ou des) architecture(s) cible(s) (4k).....	199
2.5.3.1) Architecture des ressources.....	199
2.5.3.2) Architecture cible du HW30.....	202
a) Interconnexions spatiales des ressources pour le HW30.....	202
b) Interactions temporelles du HW 30.....	203
2.5.4) Évaluation des performances de la (ou des) architecture(s) (4l).....	207
2.5.5) Sélection d'une architecture (4m).....	207
2.6) Synthèse de la démarche d'introduction de l'UGV.....	208
2.6.1) Diagramme d'activités de PIA.....	208
2.6.2) Définition des phases 5 et 6.....	210
a) Comportement du système au niveau 3.....	210
b) Comportement du système au niveau 4.....	210
c) Technologie des composants de la machine.....	210
3) Validation de la méthode.....	211
3.1) Validation industrielle partielle du modèle de problèmes.....	211
3.2) Validation de la démarche par l'étude de cas Usocom.....	212
3.3) Quantification d'indicateurs de performance.....	212
Conclusion et perspectives.....	215
Bibliographie.....	219
Annexes.....	229

Index des Figures

Figure 1 : Le paradigme systémique [Le Moigne 1977].....	22
Figure 2 : Référentiel Temps, Espace, Forme [Le Moigne 1977].....	23
Figure 3 : Structure d'un système de production [ISO TC 184 2002].....	24
Figure 4 : Structure d'un système de production par GRAI [Marcotte 1995].....	26
Figure 5 : Modèle GRAI du système décisionnel [Doumeingts 2000].....	27
Figure 6 : Décomposition des processus [Livet 2002].....	29
Figure 7 : Exemple de modélisation par les contradictions [Messaoudene 2003].....	32
Figure 8 : Première loi d'évolution des systèmes techniques [Salamatov 1999].....	34
Figure 9 : Propriété fractale du modèle des systèmes techniques.....	35
Figure 10 : Modèle de gamme d'usinage [Bourdet 1990].....	37
Figure 11 : Synthèse de la décomposition du système physique de production.....	40
Figure 12 : Structure et fonctions de référence des systèmes de production.....	41
Figure 13 : Structure et dualité Produit/Ressource.....	42
Figure 14 : Modèle des Systèmes Opérationnels de Production.....	44
Figure 15 : Synthèse des sous-processus, environnements, produits et ressources..	47
Figure 16 : Formes de copeaux en fonction de la dureté du matériau et de la vitesse de coupe [Poulachon 1999].....	49
Figure 17 : Configuration de la coupe orthogonale.....	50
Figure 18 : Phénomène Stick-Slip à la formation du copeau [Altintas 2000].....	50
Figure 19 : Définition des zones de cisaillement à la formation du copeau [Altintas 2000].....	50
Figure 20 : Section d'un copeau dentelé [Le Calvez 1995].....	52
Figure 21 : Copeau à zone de cisaillement localisé [Komanduri 1982].....	53
Figure 22 : Modélisation de la formation du copeau par [Schulz 1989].....	54
Figure 23 : Copeau et surface obtenus en coupe instable.....	55
Figure 24 : Schématisation du comportement vibratoire de l'outil.....	55
Figure 25 : Modélisation des vibrations régénératives [Altintas 2000].....	56
Figure 26 : Lobes de stabilité [Peigne 2003].....	57
Figure 27 : Critères de qualité dans le référentiel TEF.....	59
Figure 28 : Températures de formation des copeaux pour les grandes classes de matériaux [Sandvik 2002].....	62
Figure 29 : Aire usinée en fonction du matériau outil pour une fonte [Fallbohmer 2000].....	63
Figure 30 : Rugosité en fonction du nombre de pièces produites [De Souza 2003]..	64
Figure 31 : Rugosité et défaut de forme pour un outillage de forge en fonte [Lopez de Lacalle 2002].....	65
Figure 32 : Micrographie montrant la couche blanche [Dawson 2002].....	66
Figure 33 : Usure en cratère d'une plaquette PcBN [Dawson 2002].....	70
Figure 34 : Usure en dépouille d'une fraise hémisphérique [Dolinsek 2001].....	70
Figure 35 : Arête rapportée sur une plaquette PcBN [Dawson 2002].....	70

Figure 36 : Rupture d'une plaquette PcBN [Liu 2002].....	70
Figure 37 : Technologies de surveillance pendant l'usinage [Furet 2002].....	72
Figure 38 : La dynamique concurrentielle [HEC 1997].....	77
Figure 39 : Cycle de vie d'un produit [HEC 1997].....	84
Figure 40 : Stratégie technologique et stratégie générale [Vernet 1997].....	85
Figure 41 : Grille GRAI du mode 1.....	86
Figure 42 : Grille GRAI du mode 2.....	87
Figure 43 : Architecture de référence de GERAM [ISO TC 184 2002].....	89
Figure 44 : Synchronisation des besoins et de la connaissance du produit [Girard 2004].....	94
Figure 45 : Disciplines, acteurs et interactions.....	96
Figure 46 : Architecture de référence de CIMOSA [Vernadat 1999].....	101
Figure 47 : Processus d'évolution d'un système de production [Malhéné 2003].....	103
Figure 48 : Vision Multi-écrans d'OTSM-TRIZ [Khomenko 2002].....	104
Figure 49 : Coûts le long du cycle de vie des ressources [Durairaj 2002].....	108
Figure 50 : Méthode de conception basée sur le LCCA [Woodward 1997].....	110
Figure 51 : Données et objectifs de la méthode de [Bokhorst 2002].....	112
Figure 52 : Décisions stratégiques dans l'investissement d'un équipement de production [Yurdakul 2004].....	113
Figure 53 : Motif de base du diagramme des inducteurs de coûts.....	118
Figure 54 : Diagramme de classes synthétique en UML du MSOP.....	121
Figure 55 : Cycle d'abstraction classique [Rochfeld 1983].....	126
Figure 56 : Architecture générique du système usinant cible.....	129
Figure 57 : Cycle d'abstraction proposé.....	130
Figure 58 : Mécanisme d'un compromis.....	134
Figure 59 : Apport d'OTSM-TRIZ par rapport à un compromis.....	135
Figure 60 : Cycle d'abstraction d'OTSM-TRIZ [Khomenko 2002].....	136
Figure 61 : Schéma bloc du modèle des contradictions d'OTSM-TRIZ.....	139
Figure 62 : Contradiction entre deux grandeurs.....	140
Figure 63 : Contradiction physique.....	141
Figure 64 : Objectifs de performance et performance mesurée [Ducq 2001].....	144
Figure 65 : Décomposition d'un processus de conception du PSD [Cochran 2000].	151
Figure 66 : Contradictions de la fonction « assurer un Retour sur Investissement à long terme ».....	152
Figure 67 : Contradiction dans la possession d'un équipement [Woodward 1997]..	156
Figure 68 : Contradictions de la fonction « faire des produits de QUALITE ».....	158
Figure 69 : Contradictions de la fonction « faire une DIVERSITE de produits ».....	163
Figure 70 : Diagramme de classes synthétique du modèle de problèmes en UML.	169
Figure 71 : Modélisation de $E_i(X_i)$	171
Figure 72 : Diagramme des cas d'utilisation de la méthode PIA (UML).....	182
Figure 73 : Extrait de l'annexe U1 (Pb4).....	185
Figure 74 : Classement en précision du Pb4.....	187

Figure 75 : Décomposition du Pb4 tirée de l'annexe U3.....	189
Figure 76 : Extrait de l'annexe U4 (traitement de Pb4).....	191
Figure 77 : Rendus de CAO du carter HW30.....	195
Figure 78 : Décomposition de l'élément de performance FLEXIBILITE.....	201
Figure 79 : Contrat de phase partiel (version 233).....	206
Figure 80 : Diagramme d'activités de la méthode PIA.....	209

Index des Tableaux

Tableau 1 : Modèle d'un atelier de production ISO 10314.....	25
Tableau 2 : Critères de qualité pour les copeaux et les surfaces.....	60
Tableau 3 : Critères de qualité pour les pièces et les lots.....	61
Tableau 4 : Modes d'usure des arêtes de coupe en UGV.....	70
Tableau 5 : Classement des critères influencés par l'UGV.....	78
Tableau 6 : Phases du cycle de vie [ISO/IEC 15288 2002].....	88
Tableau 7 : Déclinaison des éléments de performance E1 et E2.....	147
Tableau 8 : Déclinaison de E5 et E6.....	150
Tableau 9 : Déclinaison des paramètres de l'élément INFLOWS.....	153
Tableau 10 : Déclinaison du paramètre X1.....	154
Tableau 11 : Déclinaison des paramètres de l'élément OUTFLOWS.....	155
Tableau 12 : Déclinaison du paramètre X2.....	157
Tableau 13 : Déclinaison des paramètres de l'élément DELAI.....	159
Tableau 14 : Exemples de déclinaison du paramètre X3.....	160
Tableau 15 : Déclinaison des paramètres de l'élément PRECISION.....	162
Tableau 16 : Déclinaison des paramètres de l'élément FLEXIBILITE.....	164
Tableau 17 : Déclinaison du paramètre X5.....	165
Tableau 18 : Déclinaison des paramètres de l'élément REACTIVITE.....	167
Tableau 19 : Action des paramètres Xi sur les éléments de performance.....	172
Tableau 20 : Effets des variations de X3 et X4 sur E3 et E4 avec l'UGV.....	173
Tableau 21 : Effets des variations de X5 et X6 sur E5 et E6 avec l'UGV.....	175
Tableau 22 : Imprévisibilité des aspects économiques.....	176
Tableau 23 : Classement initial des problèmes.....	186
Tableau 24 : Résultat de la localisation des problèmes.....	189
Tableau 25 : Modification de la localisation du problème.....	191
Tableau 26 : Assurance de la performance dégradée.....	191
Tableau 27 : Correspondance technique d'un problème économique.....	192
Tableau 28 : Extrait de l'annexe U4 concernant les problèmes de lubrification.....	192
Tableau 29 : Synthèse des objectifs des architectures	198
Tableau 30 : Description des architectures génériques.....	200
Tableau 31 : Éléments d'architecture spatiale des composants.....	203
Tableau 32 : Éléments d'architecture validés.....	203
Tableau 33 : États intermédiaires pour chaque entité d'usinage.....	204
Tableau 34 : Plan d'action pour la mise en place des tests.....	205

Introduction

1) Problématique industrielle

Le problème initial se posait sous la forme de deux interrogations :

- Est-il intéressant d'introduire de l'UGV dans un Système de Production existant ?
- Si c'est effectivement le cas, comment l'implanter au meilleur de son potentiel ?

Ces deux questions sont issues de constatations de l'évolution du marché de l'industrie mécanique. Les machines d'Usinage Grande Vitesse (Fraisage et « Tournage dur ») ont connu un essor considérable dans les secteurs de la fabrication de moules et matrices, de l'aéronautique et parfois de l'industrie automobile [Vidal 2004]. Par contre, les entreprises du secteur de la mécanique générale restent encore relativement frileuses à l'intégration de cette nouvelle technologie dans leurs ateliers.

La formalisation des impacts de l'introduction de l'UGV est recherchée, par la compréhension du fonctionnement des systèmes de production utilisant les procédés d'usinage et des mécanismes d'évolution des méthodes et moyens d'usinage. Elle est ensuite exploitée dans la construction d'une méthode de conception de système de production, visant à aider à formuler les besoins de l'industriels et à le guider dans ses choix de solutions d'implantation des moyens de production. L'industrie mécanique, mais aussi l'enseignement de la fabrication, sont les domaines privilégiés où les contributions à cette problématique ont des débouchés potentiels.

2) Positionnement, Objectifs et contributions

Nos travaux de recherche s'inscrivent dans la thématique proposée par l'Équipe de conception intégrée, partie du laboratoire de recherche LICIA. En s'appuyant sur les applications et problématiques industrielles sur lesquelles les élèves de l'INSA sont impliqués, notre thématique de recherche s'est concentrée sur les méthodes de conception à déployer dans les projets industriels.

Elles concernent les évolutions des systèmes de production utilisant l'Usinage Grande Vitesse, et les systèmes d'informations associés. Une première thèse, [Goepf 2003], a été soutenue sur ce thème au sein du laboratoire de recherche.

L'évolution du marché montre une tendance à la disjonction de la communauté des utilisateurs de procédés (ceux qui utilisent des moyens de production pour transformer des produits) et celle des concepteurs de composants du process de transformation. L'Usinage Grande Vitesse fait partie des procédés dont les développements récents se sont inscrits dans ce contexte. Les contraintes technologiques liées à l'UGV et les performances attendues font que l'optimisation des composants du système demande de mettre en œuvre des outils de conception plus complexes et onéreux.

Ce n'est donc pas l'industrie transformatrice qui développe directement le procédé d'UGV et les composants associés. Par contre, elle a potentiellement à les mettre en œuvre. Elle est donc contrainte, dans une certaine mesure, à devoir les maîtriser et à connaître leurs interactions avec leur environnement.

A ce sujet, [Dagiloke 1995] constatait déjà il y a près de dix années que : « un des aspects négligés de l'UGV a été l'implémentation de la technologie dans l'industrie basée sur une analyse complète du process ». Cette problématique s'est avérée pesante à la fois pour la communauté scientifique et pour les industriels. L'analyse de l'adéquation d'un moyen de production aux applications spécifiques d'un industriel demeure d'ailleurs un thème récurrent des revues de vulgarisation, dont [Scherer 2002] et [Rouaud 2004] sont des exemples.

La disjonction progressive entre la communauté des « développeurs » (de moyens et méthodes) et celle des « utilisateurs » pousse d'ailleurs à multiplier les collaborations entre communautés universitaire et industrielle. Le succès des Assises de l'UGV et de la Machine-Outil, congrès français proposant à la fois des contributions techniques et scientifiques, en est un exemple remarquable. [Fiorini 2004], [Geiskopf 2004a], [Greffioz 2004] sont des exemples de ces apports. Les industriels « développeurs » et « utilisateurs » ont besoin de communiquer sur leurs travaux respectifs, et d'impliquer les scientifiques dans leurs démarches : acquérir de la connaissance sur la technologie et sur son intégration en production. Paradoxalement, les travaux scientifiques et industriels ont conduit à l'apparition de multiples modèles analytiques, numériques, systémiques à la fois dans les domaines techniques, organisationnels et gestionnaires.

Le premier objectif est de contribuer à relier les contributions scientifiques (outils, méthodes, technologies) à des problématiques industrielles. Cette formalisation des connaissances relatives à l'UGV a pour objectif d'assister le concepteur de système de production à trouver les bonnes méthodes et outils, si elles existent déjà dans la littérature, en fonction de ses besoins. Cela passe par la compréhension du fonctionnement des systèmes de production, donc par leur modélisation [Le Moigne 1977] combinée avec l'étude des processus d'évolution de systèmes de production, envisagée par une migration vers l'UGV.

Le premier chapitre de cette étude présente en détails la perception actuelle et le traitement de ces contraintes technologiques, en s'appuyant sur un modèle des systèmes opérationnels de production développé spécifiquement. Les impacts potentiels de l'introduction de l'UGV dans un système de production sont formalisés et classés, au travers d'une modélisation systémique d'un atelier de production. L'extension aux considérations managériales, inhérentes à un tel projet, montre la nécessité d'une approche globale pour la méthode de conception.

Le deuxième chapitre a pour objectif d'analyser les méthodes actuelles de conception des systèmes de production, en montrant les limites quant à leur instanciation dans les phases amont des projets d'introduction d'un nouveau procédé. Les approches stratégiques et fonctionnelles classiques en phase de conceptualisation (définition des besoins) y sont discutées et la complexité du processus de conception démontrée quantitativement. En complément, les bonnes pratiques de la conception intégrée au cours des phases de conception des projets sont mises en évidence (étude du cycle de vie et communication interdisciplinaire),

pour chercher à construire un outil aidant l'intégration des disciplines inhérente à l'avant-projet.

Le troisième chapitre présente tous les concepts intégrés dans la méthode de conception de système de production usinant, intitulée PIA. Elle se compose notamment d'un cycle d'abstraction original, de deux modèles spécifiques (le Modèle des Systèmes Opérationnels de Production et le Modèle de Problèmes) et d'une démarche d'application. Elle a pour objectif la rédaction d'un cahier des charges pour des investissements dans le domaine de l'Usinage à Grande Vitesse, répondant à des besoins opérationnels et stratégiques cohérents. Ce cahier des charges est la traduction de l'architecture du système cible, assurant la cohérence du système lors des phases de conception pluridisciplinaire. La construction de l'architecture du système s'appuie sur la reformulation et le classement des problèmes des acteurs du système de production. Les deux modèles sont exploités pour diagnostiquer le système par les problèmes des acteurs du système. Notre proposition de modélisation offre un cadre pour le recensement exhaustif des dysfonctionnements potentiels d'un système de production. Elle complète les éléments introduits dans les deux premiers chapitres, finalisant ainsi la formalisation des contraintes Produit / Process, pour les procédés d'usinage.

Les résultats du processus de formalisation des contraintes produit/process, les deux modèles de référence et les principes du cycle d'abstraction, sont exploités dans une démarche structurant le processus d'évolution des systèmes de production, basés sur le procédé d'usinage. Le quatrième chapitre présente les phases de cette démarche. Une collaboration avec la société SEW-USOCOME implantée à Haguenau (France 67), est le support d'application et de validation. Des entretiens au sein d'un groupe de travail sont menés entre les spécialistes de l'atelier et des analystes extérieurs, sur la base des problèmes rencontrés dans le système de production particulier. La confrontation des connaissances particulières des spécialistes aux connaissances générales du domaine de l'usinage (le Modèle des Systèmes Opérationnels de Production et le Modèle de Problèmes) aboutit à une représentation partagée de tous les problèmes à résoudre dans l'atelier. Les besoins de l'industriel sont formulés et classés hiérarchiquement en exploitant les deux modèles. L'UGV est envisagé comme une solution potentielle à ces problèmes.

La conception du cahier des charges du système (orienté UGV) se décompose en deux phases : identification d'un sous-ensemble représentatif et construction de l'architecture du système cible. Au cours de ces deux phases, les deux modèles sont utilisés pour restreindre le champ d'investigation des solutions envisageables, pour converger vers l'architecture du système cible. Les tests de simulation numérique et d'usinage permettant de combler le manque de connaissances du nouveau procédé sont élaborés, en travaillant sur une pièce représentative des difficultés identifiées. Le traitement et l'exploitation des résultats des tests assurent la finalisation de l'architecture complète du système.

Chapitre 1 : Modélisation des systèmes de production et du procédé d'Usinage Grande Vitesse

Introduire le procédé d'Usinage Grande Vitesse dans un atelier de production se traduit évidemment par la modification de tout ou partie d'un système de production en fonctionnement. Pour évaluer les changements ainsi induits, dans le contexte d'une démarche de conception, il faut auparavant identifier ces changements potentiels.

Ce chapitre a pour objet de formaliser les impacts d'une évolution du procédé d'usinage sur le système de production (impacts techniques et stratégiques). L'évaluation des enjeux économiques d'une telle évolution (investissements en moyens de production, gains potentiels...) fait l'objet d'une partie du second chapitre, puisque cette étape est un élément de la démarche de conception à mettre en œuvre.

Dans un premier temps, l'étude de la modélisation des systèmes de production est menée, dans l'objectif de trouver un modèle permettant de classer les contributions des différents travaux de recherche et développements industriels. Puis, l'analyse détaillée des impacts de l'introduction de cette évolution des procédés d'usinage est présentée dans la seconde partie. Elle est ainsi présentée suivant la grille de lecture construite progressivement dans la première partie.

1) Modélisation des systèmes opérationnels de production

La formulation initiale du problème (« est-il intéressant d'introduire de l'UGV dans un Système de Production existant ») oriente l'étude vers un objectif intermédiaire de compréhension du fonctionnement d'un système de production, en plaçant les interactions avec le procédé comme le besoin principal.

Dans un premier temps, les termes essentiels de l'étude sont définis. Les définitions choisies servent alors de structure d'analyse de la modélisation des systèmes de production, en cherchant à répondre au besoin identifié : la définition d'un modèle des systèmes de production structurant les impacts du nouveau procédé sur le système de production.

1.1) Notions fondamentales

Comme la vue « système » est proposée, les principes de la systémique en constituent le socle scientifique. Les modèles des systèmes de production existants sont ainsi analysés par leur adéquation à ces principes et à leur prise en compte des technologies de transformations de produits, et de l'usinage en particulier.

Les concepts de « système » et de « changement » sont donc fondamentaux pour cette étude.

a) Description d'un système de production

Un système production est une classe particulière du système général. Un système est décrit par [Le Moigne 1977] comme étant « un objet qui, dans un environnement, doté de finalités, exerce une activité et voit sa structure interne évoluer au fil du temps, sans qu'il perde pourtant son identité unique ».

La figure (1) illustre les interactions sous-jacentes à cette description. Le paradigme systémique met en interaction les trois pôles de l'objet (Structure, Évolution, et Activité) au sein d'un environnement, et pour respecter des finalités données. Les événements apparaissant dans la vie du système « façonnent l'objet » : l'environnement et les finalités influencent l'objet (représenté par ses trois pôles) au cours de son histoire.

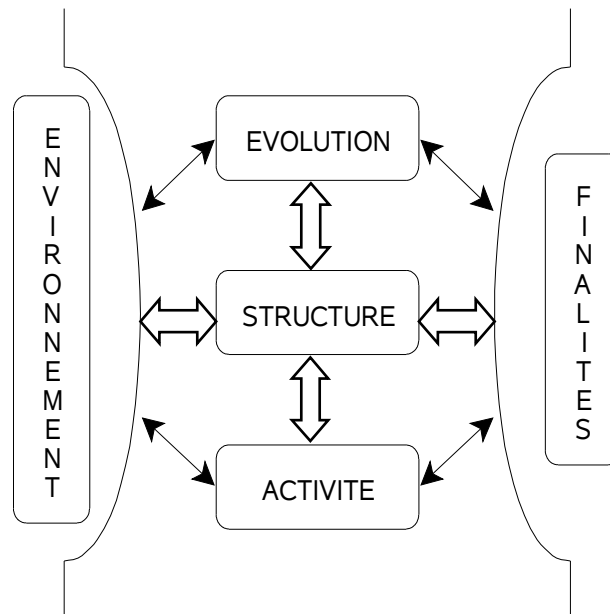


Figure 1 : Le paradigme systémique [Le Moigne 1977]

Comprendre un système de production revient donc à représenter les trois concepts caractérisant le système :

- Son pôle génétique : l'histoire du système, décrivant son évolution dans le temps ;
- Son pôle-ontologique : ce que le système est, décrivant sa structure ;
- Son pôle fonctionnel : ce que le système fait, décrivant ses activités.

b) Changement du système

Un système se définit par les processus autour desquels sont organisés des processeurs, dans le but de transformer des éléments processés. Le Moigne distingue trois types de transformation :

- Transformations spatiales : elles affectent la position de l'élément processé ;
- Transformations temporelles : elle affectent les stocks des éléments processés ;
- Transformations morphologiques : elles modifient la forme de l'élément processé.

Ces trois transformations ne peuvent modifier l'état que de trois types d'intrants :

- de la matière ;
- de l'information ;
- de l'énergie.

Changer, c'est affecter la position d'au moins un objet dans le référentiel Temps – Espace – Forme. La figure (2) illustre ce changement de coordonnées dans le référentiel TEF.

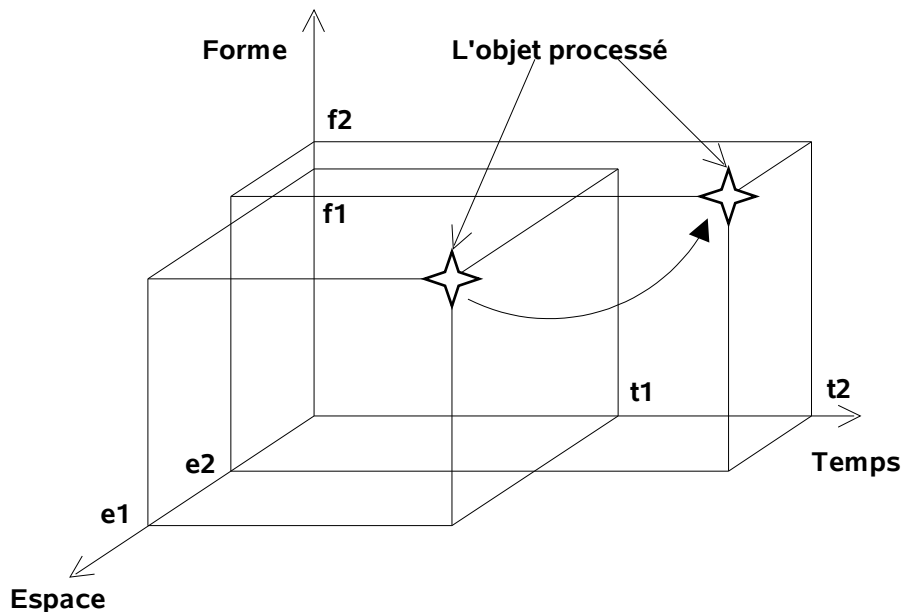


Figure 2 : Référentiel Temps, Espace, Forme [Le Moigne 1977]

1.2) Modélisation des systèmes physiques de production

Le paragraphe précédent a montré que modéliser un système de production demande d'en fournir la description des activités transformant des objets traités, la description de sa structure et celle de son évolution.

Ces trois aspects sont étudiés dans les trois prochains paragraphes. Pour chacun d'eux, le niveau de prise en compte des transformations morphologiques, les procédés utilisés, et le formalisme proposé, sont étudiés.

La lecture des modèles est guidée par nos besoins, centrés sur deux propriétés principales. D'une part, le modèle recherché doit formaliser la structure et les fonctions d'un système de production, en présentant un degré de détail adapté aux procédés d'usinage. D'autre part, une représentation compacte de cette classe de systèmes est recherchée, pour en faciliter l'appropriation.

1.2.1) Modélisation de la structure des Systèmes de production

Un système de production est un sous-système d'une entreprise. Dans un premier temps, les modélisations et méthodes de modélisation d'entreprise sont

étudiées, pour en dégager la part consacrée au système opérationnel correspondant au cadre d'exploitation des procédés d'usinage.

Les travaux de modélisation d'entreprise proposent des architectures de référence. M. Vernadat recense les architectures de l'ISO, de CIMOSA, de la CEN ENV 40 003, de GRAI/GIM, de PERA, d'ARIS [Vernadat 1999]. Ce paragraphe ne s'intéresse qu'à la structure des sous-systèmes opérationnels de production. Les méthodes de conception sont abordées dans le chapitre 2.

Parmi les architectures de référence citées ci-dessus, seuls les modèles issus de GRAI [Dougmeints 1984] et d'une partie de l'ISO 10314 [ISO TC 184 2002] s'attachent à la modélisation de la structure des ateliers de production. La figure (3) présente une structure commune aux deux modèles.

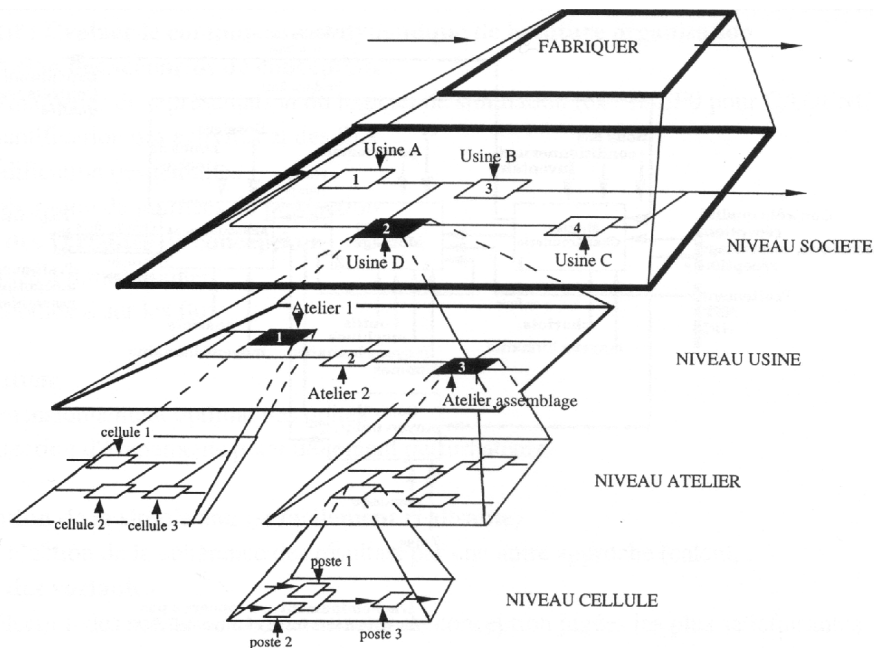


Figure 3 : Structure d'un système de production [ISO TC 184 2002]

Le tableau (1) présente une forme de structure d'un atelier de production proposée par l'ISO 10314 (Shop Floor Production Model). La structure est décomposée en quatre niveaux, dont le plus « technique », le niveau 1, est celui de l'équipement. Au sein d'une cellule de fabrication (niveau 3), plusieurs postes de travail (niveau 2) sont coordonnés : un poste d'usinage, un de métrologie par exemple. Dans chaque poste, plusieurs équipements exécutent des tâches : un robot, un centre d'usinage, une machine à mesurer tridimensionnelle.

	Niveau	Sous-activité	Responsabilités
4	Section / Zone	Superviser le process de production dans un atelier	Superviser, coordonner la production, suivre les travaux, obtenir des ressources et les allouer aux travaux
3	Cellule	Coordonner le process de production dans un atelier	Planifier et superviser les travaux de production dans un atelier
2	Poste	Commander le process de production dans un atelier	Diriger et coordonner le process de production
1	Équipement	Exécuter le process de production dans un atelier	Exécuter les travaux selon les commandes

Tableau 1 : Modèle d'un atelier de production ISO 10314

A cette structure, viennent correspondre les activités de supervision, coordination, direction et exécution. Les modèles de GRAI s'attachent plus particulièrement à formaliser les relations entre les activités relevant du système physique et celles d'un système décisionnel.

GRAI est une approche créée initialement par le professeur Doumeings puis développée au LAP de Bordeaux. Elle regroupe le modèle GRAI (Modèle de référence et ses formalismes), la méthode GRAI (partie décisionnelle). Plusieurs travaux se sont ensuite appuyés sur ces concepts fondamentaux [Doumeings 2000], dont nous retenons à titre d'exemple :

- GRAI-GIM : ensemble de méthodes permettant d'élaborer le modèle GRAI d'une entreprise [Chen 1997] ;
- Des méthodes pour les systèmes d'indicateurs de performances [Ducq 2001] ;
- DMDS : modélisation dynamique des systèmes décisionnels [Poler 2002].

L'aspect structurel du système de production n'est pourtant traité que dans le modèle GRAI et les grilles GRAI. Seuls ces deux concepts sont présentés brièvement ici. Le modèle GRAI s'appuie sur les fondements de la systémique, en partie exposés dans le paragraphe précédent.

Un tel système est l'union d'un système d'informations, d'un système physique et d'un système décisionnel, dont la structure est représentée sur la figure (4). Ils se définissent par :

- Le système opérationnel transforme des entités entrantes en entités sortantes ;
- Le système décisionnel contrôle cette transformation ;
- Le système d'informations relie le système opérationnel et le système décisionnel, et assure la liaison avec l'environnement.

GRAI se concentre principalement sur la modélisation des liens au sein de la structure du système décisionnel [Girard 2004].

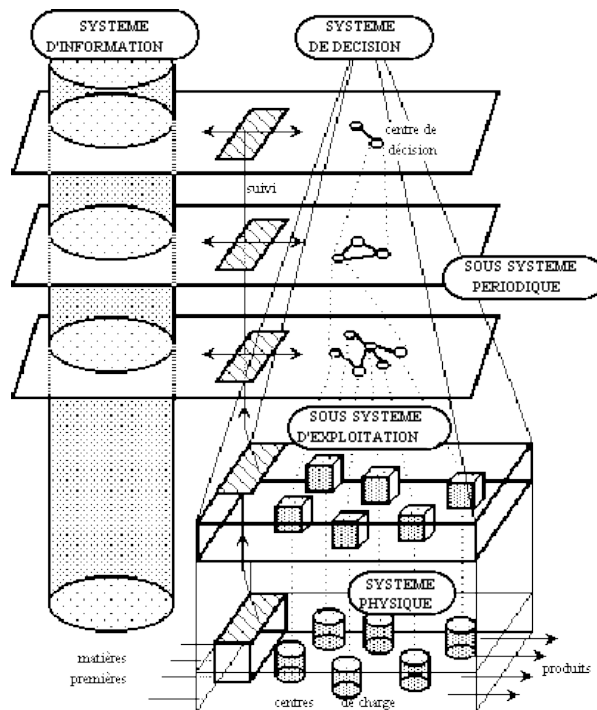


Figure 4 : Structure d'un système de production par GRAI [Marcotte 1995]

IDEF0 est le formalisme utilisé pour représenter le fonctionnement du système physique. Cette méthode d'analyse a été, entre autres, présentée par [Lissandre 1990]. L'approche systémique est adoptée et la modélisation des activités menées dans le sous-système en est le résultat. Cet aspect est détaillé dans le prochain paragraphe.

« L'ontologie de GRAI consiste en un format d'une macrostructure permettant de conceptualiser la structure globale de l'architecture de la décision, et un format de microstructure pour conceptualiser l'architecture des centres de décision. » [McCarthy 2002]. Les grilles GRAI proposent une représentation graphique de ces différents types de structure, en se focalisant sur le système décisionnel.

Les centres de décision du système sont organisés autour de trois fonctions fondamentales :

- **Gérer les Produits**
- **Gérer les Ressources**
- **Planifier**

Les déclinaisons de ces fonctions sont proposées en détail dans les grilles GRAI, suivant des horizons de planification (court, moyen et long termes). La figure (5) expose le modèle GRAI pour le contrôle de chacune des fonctions de référence [Doumeingts 2000].

Les centres liés à la gestion des produits et ceux liés aux ressources sont coordonnés et synchronisés par les centres « planificateurs ». Chacun doit néanmoins prendre à son niveau des décisions d'ordre stratégique (à long terme), tactique (à moyen terme) et opérationnel (à court terme). Ces décisions sont modélisées par des flèches doubles sur la figure (5). Les centres peuvent également avoir des relations d'information avec d'autres, si exigé par la fonction de

synchronisation. Ces relations sont représentées par des flèches simples sur la figure (5).

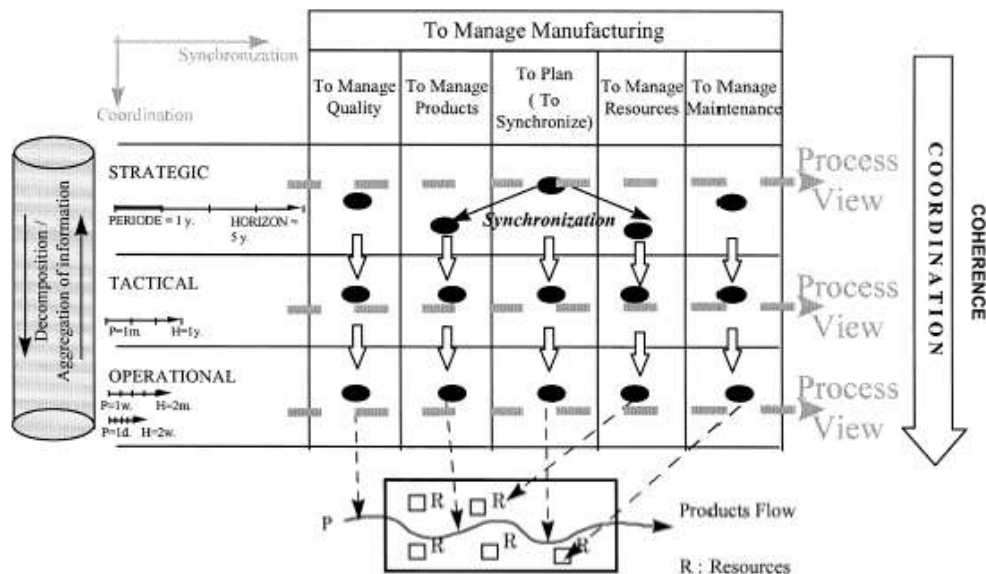


Figure 5 : Modèle GRAI du système décisionnel [Doumeings 2000]

Ainsi, une structure du système de production est proposée pour chacun de ses sous-systèmes (opérationnel et décisionnel). Néanmoins, le niveau de détail de la structure proposé par ces deux modèles n'est pas assez précis, en ce qui concerne le système physique du moins, pour prendre en compte les multiples interacteurs liés à un procédé. Les ressources utilisées en atelier sont vues au seul niveau de l'équipement, soit l'équivalent de la machine-outil pour le domaine de l'usinage. La description est orientée vers une représentation Flux/Stocks des produits du système. Les travaux scientifiques allant dans ce sens sont maintenant présentés au travers de la modélisation des activités d'un système physique.

1.2.2) Modélisation des activités d'un système de production

Cette démarche intellectuelle cherche à modéliser le fonctionnement de systèmes existants. Formaliser des fonctions génériques et les relier entre elles par une structure revient à construire une représentation d'un système physique.

Ce paragraphe s'appuie principalement sur les travaux de messieurs Barth, Livet et Messaoudene, du LRPS. En effet, ils participent à la construction d'une ontologie des systèmes de production, permettant « d'offrir un référentiel sur les principaux besoins de liaisons et de coordination entre les activités d'un même processus » [Livet 2002].

a) Définition

D'après [Vernadat 1999] : « une activité d'entreprise contribue à la réalisation d'une tâche en transformant un état d'entrée en un état de sortie et ce, en utilisant du temps et des ressources de l'entreprise ».

L'auteur rajoute « qu'une activité peut être vue comme une fonction qui transforme des objets d'entrée en objets de sortie, à partir de directives de contrôle ». La modélisation classique utilise les techniques à IDEF0 pour les formaliser. Elles permettent de représenter les relations entre les composants et les

fonctions. La fin de ce paragraphe est destinée à présenter les données génériques des activités propres à des systèmes de production, et un exemple de modélisation, afin de mettre en évidence les manques recensés.

b) Composants génériques

Le Moigne a identifié la forme des intrants et les extrants de tout système : de la matière , de l'énergie ou de l'information. L'ISO 10314 propose une synthèse des composants génériques du système :

- les informations de contrôle,
- les données (toute information autre qu'une donnée de contrôle),
- les produits,
- les ressources.

c) Fonctions génériques

Ces composants sont utilisés ou transformés au cours d'activités génériques, correspondant aux quatre types de transformations introduites par la systémique.

- **Déplacer** : action au cours de laquelle une matière ou une ressource se voit changer de position géographique. Cette fonction correspond à la transformation spatiale de la systémique.
- **Transformer** : cette activité couvre tous les types de réalisation manufacturière (découpe, assemblage...) ainsi que les modifications d'état (transformer l'environnement). Elle correspond à la transformation morphologique de la systémique.
- **Contrôler** : regroupe l'ensemble des activités de contrôle, mesure de dimension, de qualité, de délai. C'est une transformation morphologique d'une information.
- **Supporter** : elle englobe les activités « stocker » et « contenir » au sens large. C'est le fait de retenir des informations, des données, des produits, ou des ressources en un lieu spécifique du système physique de production. C'est une transformation temporelle d'un produit.

La fonction « supporter » conceptualise le fait que tout système de production peut s'envisager sous la dualité Flux-Stock. Tout élément traité passe successivement de situations de stockages (pour la matière et l'énergie), ou de mémoire (pour les informations), à des situations de transformations spatiale ou morphologique. L'enchaînement successif flux-stock est un processus.

d) Exemple de modèle par activités

[Livet 2002] propose une classification des 29 composants de référence utilisés au cours de 561 activités de référence. Les relations entre ces deux classes de référence sont formalisées par des matrices. Voici les composants liés aux transformations morphologiques des produits bruts :

- **MOU : moyen d'outillage.** Ressources techniques affectées temporairement ou non à poste de travail et servant à la production d'un article (Moule, matrice, outils, perceuse, etc...)
- **MPR : moyen de production.** Ressources allouées à la production de valeur ajoutée (de façon permanente). Une scie circulaire, une presse hydraulique en sont des illustrations. Dans le cas où le moyen de production serait déplacé, cette action constitue une reconstitution du système de production.
- **PPR : personnel de production.** Personnes affectées à la conduite du système de production (opérateur, régléur, agent de maintenance, agent de manutention, magasinier, etc...).

A ces moyens techniques et humains, se rajoutent des zones (zone de poste, zone moyen outillage...).

En complément à ces composants de référence, Livet propose une modélisation d'un système de production par la hiérarchie des processus, des activités, des composants liés à ces activités et les sous-activités réelles des composants. La figure (6) synthétise les relations entre ces concepts.

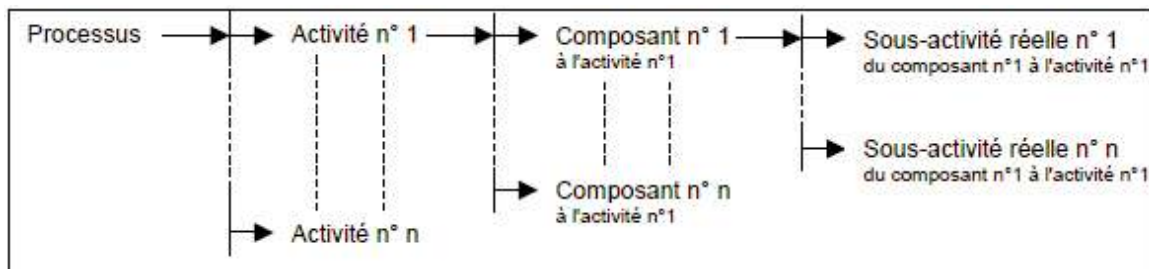


Figure 6 : Décomposition des processus [Livet 2002]

Le but de la conception de ce modèle est de proposer un cadre, aux gestionnaires du système, pour décrire la structure de leur système, puis de quantifier les coûts des activités identifiées.

Les outils, modèles et méthodes mises en place ont prouvé leur efficacité dans les analyses économiques a posteriori d'installations en fonctionnement. Mais, dans notre démarche a priori, elle n'est pas assez précise pour pouvoir prédire les impacts d'un changement de procédé, de façon générique. Les composants de référence liés aux procédés de transformation sont certes génériques, mais pas assez représentatifs des solutions technologiques propres à l'usinage.

1.2.3) Modélisation de l'évolution des systèmes physiques de production

De l'examen de la littérature, il ressort que peu de travaux portent sur la compréhension des phénomènes à l'origine de l'évolution d'un système de production, et sur les méthodes destinées à structurer un processus d'évolution.

Dans un premier temps, les propriétés d'un processus d'évolution sont étudiées, puis deux approches concernant les systèmes de production sont évaluées, quant à leur possible prise en compte des impacts de l'introduction de l'UGV. L'objectif de ce paragraphe n'est pas de présenter les méthodes guidant les

concepteurs lors de projets d'évolution de systèmes de production, mais d'étudier comment l'évolution de tels systèmes peut être modélisée.

1.2.3.1) Évolution et transformation

La systémique définit le processus du Changement (cf. §1.1 de ce chapitre), par la modification de la position d'au moins un objet dans le référentiel Temps – Espace – Forme. La modélisation des activités d'un système de production a mis en évidence les transformations spatiales et temporelles des produits et des ressources, ainsi que la transformation morphologique des produits.

Dans ce référentiel de transformations (TEF), l'évolution d'un système de production peut être vue comme un processus de transformation morphologique des ressources du système, de leur structure et de leurs relations, suite à un événement déclencheur.

Les trois dimensions suivantes caractérisent l'évolution temporelle d'un système [Malhéné 2000] :

- La date de déclenchement du changement et la durée de sa propagation ;
- L'amplitude du changement ;
- Le rythme du changement.

En s'appuyant sur la caractérisation d'un processus d'évolution proposé par Malhéné, les trois propriétés d'un processus d'évolution se formulent, dans le cas des systèmes de production (procédé d'usinage), sous la forme de trois questions. L'état de l'art contribue à en donner des éléments de réponse.

- Pourquoi le système de production doit évoluer à un moment donné de son histoire, vers une nouvelle technologie d'enlèvement matière ? En trouver la réponse revient à formuler l'explication de l'événement déclencheur.
- Quelle est l'amplitude du changement à concevoir et implanter, pour mettre en cohérence l'état du système (au moment de l'événement déclencheur) et les possibilités de la nouvelle technologie ?
- Sur quel horizon, le changement de moyens matériels, d'organisation, de ressources humaines, doit il être planifié, en prenant en compte les objectifs et capacités financières de l'entreprise ?

1.2.3.2) Compréhension du changement

Seuls des développements basés sur les modèles de GRAI et les lois de la théorie TRIZ ont été recensés dans la littérature.

a) Vision systémique de l'évolution

[Ducq 2001] et [Malhéné 2003] étudient le management de l'évolution du processus des entreprises industrielles et la mesure de performances des systèmes de production.

La prise en compte des enjeux de l'évolution du système opérationnel d'un système de production ne peut être ignorée par son système décisionnel. En effet, un système se détériore dès sa phase d'implémentation. De ce fait, la connaissance

de l'état à un instant donné du système et celle d'un état de référence sont les données qui permettent au système décisionnel d'engager des projets d'évolution.

La connaissance de l'état du système (nominal ou réel) passe par les trois points de vue suivants :

- La connaissance de la **performance** du système :

Pour gérer son évolution (déclenchement et amplitude du changement), l'entreprise a besoin de mesurer son niveau de performance et de le comparer avec des objectifs opérationnels à long terme, cohérents avec son environnement économique (marchés, concurrents, clients, etc.). Cela passe par la définition et la quantification d'indicateurs de performance représentatifs.

- La connaissance du **fonctionnement** du système :

Pour gérer le processus d'évolution (déclenchement et propagation), il est nécessaire de connaître le mode de fonctionnement d'une entreprise et le comportement de chacun de ses composants. La modélisation de ces composants et leurs interactions permet d'identifier quelle partie de l'entreprise doit être améliorée ou changée.

- La connaissance des **ressources humaines** disponibles :

Les employés d'une entreprise ne peuvent être considérés comme de simple ressources. Ils sont tous des acteurs du processus d'évolution et doivent être impliqués dans les projets d'évolution. Leur implication dans les projets doit se planifier sur les horizons stratégiques, tactiques et opérationnels.

La mise en cohérence de ces trois aspects dans les trois horizons est indispensable, comme démontrée dans [Ducq 2001]. Néanmoins, il n'est pas proposé de modélisation des interactions, qui permettrait de structurer les impacts de l'introduction d'une nouvelle technologie.

b) Lois d'évolution

La problématique industrielle posée par [Messaouedene 2002] s'inscrit dans les méthodes d'amélioration continue, visant notamment à réduire les délais de fabrication. Il se place dans le cadre du déploiement du « Lean Manufacturing ». Cette philosophie propose de piloter l'évolution du système de production à partir de représentations à base d'activités.

Ses objectifs sont donc principalement centrés sur la construction d'une méthode de conception. Ce paragraphe s'attache à étudier comment l'évolution est modélisée au travers du développement de cette problématique scientifique.

D'après l'état de l'art de [Messaoudene 2003], seule la théorie TRIZ propose des lois qui expliquent l'évolution des systèmes techniques : les lois statiques, cinématiques et dynamiques. Ces lois de la « nature », ne sont pourtant pas encore transposées aux cas particuliers des systèmes de production.

En formalisant les problèmes de conception liés à l'application du « Lean Manufacturing », les besoins fonctionnels, paramètres de conception et variables du

processus sont mis en relation. Les problèmes sont exprimés sous la forme de contradictions organisationnelles, techniques et physiques. La décomposition ainsi opérée correspond à un des modèles de référence proposé par la théorie TRIZ. Ce modèle est développé en détails plus en aval de notre étude. Les contradictions formalisent les obstacles principaux à dépasser lors de la mise en place du « Lean Manufacturing ».

La figure (7) montre un exemple de formalisme des problèmes d'évolution. Pour réduire les retards issus du lot de transfert, il faut diminuer la taille du lot de transfert. La contradiction apparaît sur les indicateurs de performance : l'effet est négatif sur les coûts de déplacement, mais positif sur les coûts de de stockage post-opérateur.

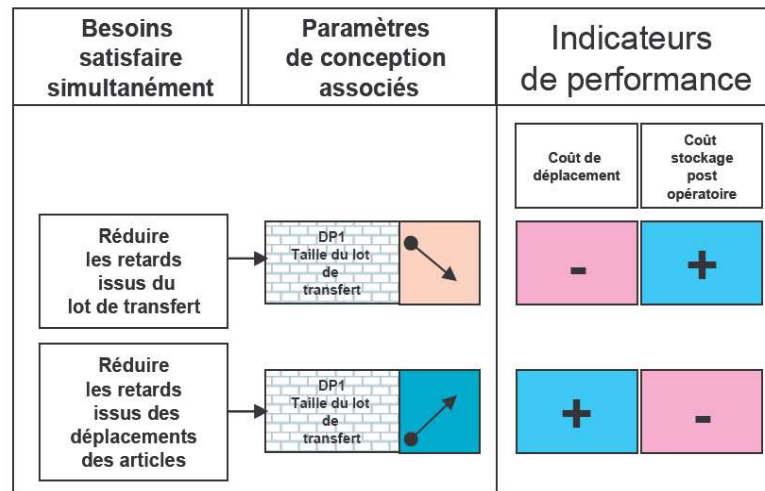


Figure 7 : Exemple de modélisation par les contradictions [Messaudene 2003]

Les perspectives prévoient d'une part, d'intégrer les lois objectives (les contradictions) et les lois d'évolution dans le processus de conception de l'Axiomatic Design [Suh 1990] afin de mieux exprimer les besoins fonctionnels. D'autre part, il est envisagé de chercher à positionner efficacement les problèmes d'évolution dans le référentiel (Système, Temps).

Cette démarche offre ainsi une première modélisation de l'évolution sous la forme de contradictions, ou de problèmes d'évolution. Les perspectives annoncées montrent tout de même les limites du modèle : il est dépendant de l'analyse fonctionnelle du système. S'il ne l'était pas, les besoins fonctionnels seraient formulés de façon exhaustive, sans être limités au Lean Manufacturing.

c) Synthèse de la modélisation de l'évolution

Les points communs entre ces deux approches visant à modéliser et guider l'évolution des systèmes de production sont :

- La détérioration de performances et de certains « paramètres » critiques (ressources humaines) du système sont les éléments qui font qu'un système est amené à évoluer. Des performances telles que la Qualité des Produits et leur Délai d'obtention sont identifiées par Ducq.

- Il n'est pas proposé de formalisation des interactions entre ces performances, et encore moins de correspondances avec des classes de solutions techniques. Seule une première proposition de modélisation de l'évolution d'un système de production a été identifiée. Elle est orientée sur la réduction des délais par la mise en place du Lean Manufacturing. La validité de cette approche quant aux autres aspects d'un système de production (les procédés de fabrication notamment) est encore à démontrer.

1.3) Synthèse des systèmes opérationnels de production

Compte tenu de l'objectif fixé, l'étude des impacts de l'introduction d'un nouveau procédé, l'étude des modèles existants met en évidence les points suivants.

- Il nous semble que les modèles proposés aient été développés pour étudier les systèmes avec la vision Flux-Stock. Ils insistent donc sur les modes de transformations temporelles et spatiales. Souhaitant étudier les impacts des modifications des transformations morphologiques, classifier les différents types de moyens de production et a fortiori leurs interactions avec les autres composants ou sous-systèmes, ils ne sont pas adaptés à notre besoin.
- Le but des modèles étudiés est de proposer un cadre pour analyser des structures existantes. Ils permettent ensuite de réaliser des études quantitatives, à partir de la représentation construite : calcul de coûts, optimisation des flux, etc... Ils n'ont pas pour intention la prédiction des impacts d'éventuelles modifications d'une des activités sur le fonctionnement global du système. Ils n'expliquent pas a priori les interactions entre les types de transformations, mais sont voués à être utilisés a posteriori.

Or, notre besoin est de chercher les impacts dus à l'introduction de l'UGV, qui pourraient être génériques, donc indépendamment d'une structure particulière.

- L'exhaustivité revendiquée par les modèles recensés, peut aussi en être une limite. En effet, la quantité d'informations à rassembler pour les appliquer à un cas particulier peut être considérable. Comme notre objectif est justement de les appliquer à une classe de procédé, le formalisme et le niveau de généralité sont incompatibles avec les fonctions d'exploration et de navigation dans le champ de connaissances.

1.4) Proposition de modèle

Notre besoin est d'établir un modèle du système de production, au niveau opérationnel, formalisant la structure et les activités des systèmes décisionnel, physique et d'information, liées aux transformations morphologiques. L'étude de l'évolution (le troisième concept caractérisant un système) de ces sous-systèmes (et des méthodes d'usinage) est l'objet des prochains chapitres.

L'utilité de ce modèle des systèmes opérationnels est d'abord de formaliser les multiples travaux autour des changements, apparaissant suite à la décision de modifier le processus de fabrication implanté dans un atelier.

Le modèle de référence utilisé est celui proposé par la théorie TRIZ. Il est le seul, à notre connaissance, proposant un degré de détail suffisant, pour compléter les modèles génériques présentés jusqu'à lors. Ce modèle de référence est d'abord présenté, dans le contexte des systèmes techniques, puis sa transposition et son instantiation aux systèmes de production est détaillée.

1.4.1) Modèle de référence de TRIZ

La théorie TRIZ énonce des principes fondamentaux auxquels obéissent tous les systèmes techniques. Parmi ceux-ci figure la « Law of System Completeness », traduit dans [Cavalucci 1999], par « Loi de complétude des systèmes techniques ». C'est la première loi d'évolution des systèmes techniques de la théorie TRIZ.

Elle s'énonce ainsi : « Tout système technique devrait être constitué de quatre composants : un moteur, une transmission, une unité de contrôle et une unité de travail. La synthèse de systèmes nécessite que tous ces composants soient définis et intégrés et que leur aptitude à remplir les fonctions du système soit évaluée. Si un seul composant manque, le système technique n'existe pas ; si un composant défaille, le système ne peut « survivre ». »

A cette loi s'ajoute un corollaire : « Pour rendre un système contrôlable, au moins un de ses composants devrait être contrôlable. Un tel système est capable de s'adapter aux demandes de l'opérateur. »

La figure (8) représente le graphisme original de cette loi d'évolution.

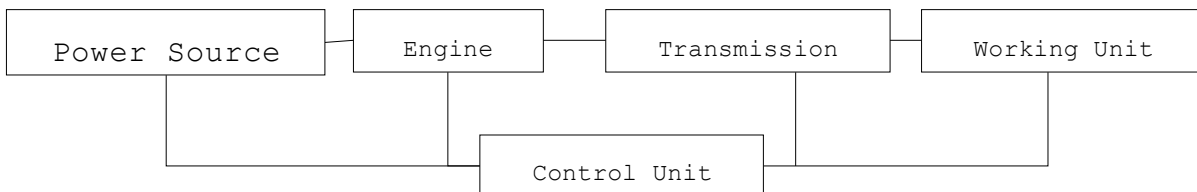


Figure 8 : Première loi d'évolution des systèmes techniques [Salamatov 1999]

[Savransky 2000], p.42, propose une définition des fonctions :

- **Unité de travail** : interagir directement avec un objet « brut », afin d'obtenir le produit désiré.
- **Moteur** : générer l'énergie initiale généralement utilisable par l'action.
- **Transmission** : transmettre l'énergie depuis le moteur vers l'unité de travail
- **Contrôle** : recueillir l'information, générer une action de contrôle, et la transmettre vers ou depuis l'unité de travail et les autres sous-systèmes.

« Un système technique ou un process technologique, ses sous-systèmes et ses super-systèmes forment une hiérarchie unique, traduisant un arrangement de composants au sein d'une structure multi-niveaux. Chaque système technique peut être divisé en sous-systèmes de degrés de granularité différents qui dépendent du champ disciplinaire d'ingénierie. » [Savransky 2000], p.37.

En croisant les deux propriétés des systèmes techniques (décomposition et granularité), le modèle devient un modèle fractal [King 2003]. Chaque composant du modèle est lui-même un sous-système et peut se représenter par l'utilisation du même motif de base (moteur, transmission, action et contrôle). Ainsi, la décomposition d'une des activités Moteur, Transmission, Action et Contrôle a toujours la même forme. La figure (9) illustre l'adaptation réalisée.

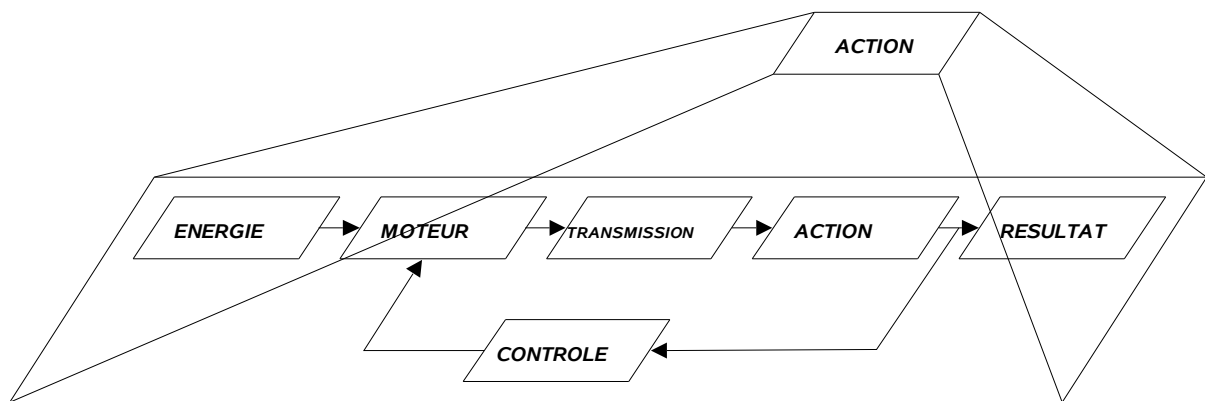


Figure 9 : Propriété fractale du modèle des systèmes techniques

De plus, la fonction de « l'unité de travail » est le lien avec le modèle Substance-Champ, concept fondamental de TRIZ. Il énonce que « le nombre minimal de composants de tout système technique est trois : deux substances et un champ. Ce modèle Substance-Champ est un modèle minimal de tout système technique fonctionnant et contrôlable » [Salamatov 1999].

Une substance (de la matière par exemple) ne peut être modifiée que par l'action d'une autre substance, par l'action d'un champ d'une autre substance (champ magnétique d'un aimant par exemple) ou par un champ extérieur (gravité ...).

La construction de l'analogie pour les systèmes de production provient de trois constatations :

- La définition de la fonction Action, peut être perçue comme une transformation morphologique d'un produit initial : « quelque chose agit sur quelque chose d'autre pour le transformer ». Ce modèle est donc centré sur la transformation morphologique, ce qui complète les modèles actuels, dont les manques du point de vue activités ont été démontrés précédemment.
- Le modèle de référence de TRIZ formalise un processus de transformation d'une énergie en un résultat désiré. Comme présentés en §1.1, les intrants et les extrants d'un système ne peuvent être que matériels, informationnels ou énergétiques. Le lien entre les composants d'un système technique et les activités des processus d'un système de production doit être précisé.

- Les substances transformées dans un système de production sont des matériaux bruts sous l'action d'autres substances (soit des moyens de production, appelés ressources).

« L'action » se formalise donc par la transformation morphologique de produits via l'utilisation de ressources. Dans la suite, les termes produit / ressources ou processé / processeur ont des significations équivalentes. Le paragraphe 1.1 a montré qu'un processus ne pouvait être défini que par l'interaction entre une ressource et un produit. Aussi, la description du système est abordée par l'identification de ces éléments. La construction de l'analogie des composants moteur, transmission et contrôle est présentée ensuite.

1.4.2) Éléments processés - processeurs - processus

Dans la suite de ce développement, les systèmes de production étudiés sont limités à ceux dont le sous-système physique s'appuie sur le procédé d'usinage par enlèvement de matière. Les perspectives de généralisation sont présentées en fin de ce chapitre.

L'objectif de ce paragraphe est d'identifier pour cette classe de système quels sont les éléments processés et les processeurs. Leurs interactions sont présentées dans le paragraphe 1.4.3.

D'après la systémique, dont les principes ont été exposés précédemment, systémographe, soit décrire un système, « c'est reconnaître conjointement le flux processé et le champ processeur, (...), de l'objet fonctionnant dans ses environnements temporels ».

1.4.2.1) Analyse des [Processus – Ressource – Produit]

Les définitions suivantes, proposées par [Bourdet 1990] sont adoptées pour la suite du développement.

- **Une phase** est le processus défini par l'ensemble des opérations réalisées sur le même poste de travail.
- **Une sous-phase** est l'ensemble des opérations réalisées sans changement du référentiel pièce (sans démontage de la pièce).
- **Une opération** est le processus au cours duquel un outil produit une forme géométrique.

Un premier formalisme a d'ailleurs été proposé par le groupe GAMA. Il relie entre eux les processus précédents. La figure (10) en illustre la structure.

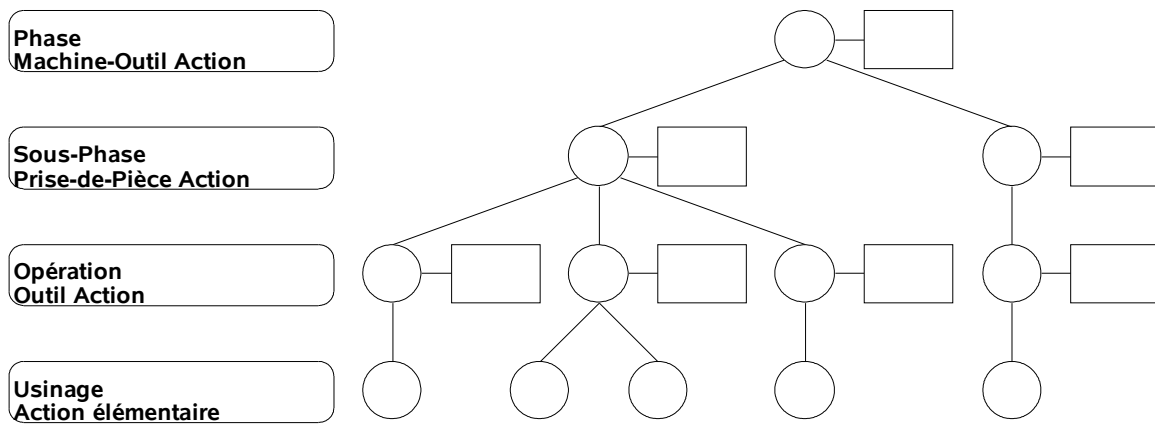


Figure 10 : Modèle de gamme d'usinage [Bourdet 1990]

a) **Système de production opérationnel (Niveau 4)**

Les lots sont des produits, dont l'enchaînement qualifie leur environnement temporel, « le Plan de Production » d'un système de production. A l'inverse, un lot peut se définir comme l'état intermédiaire du processus de « Production », du système de Production.

D'un point de vue Flux - Stock le lot transite de son stock initial vers des machines où il subit à chaque fois une nouvelle transformation morphologique, appelée **phase**. Il alterne donc transformations spatiales et temporelles, avant et après cette transformation morphologique.

Par contre, un lot n'existe dans son intégralité, que lorsqu'il passe à l'état d'extrant du système. Un lot ne prend de sens physique qu'à partir du moment où il est considéré par la série à laquelle il est intégré, la production de l'atelier en l'occurrence.

Le premier triplet [Sous-Processus – produit – ressource] identifié est donc :

- Ressource : « machine d'usinage » ;
- Produit : « Lot de fabrication » ou « État Intermédiaire de la Production » ;
- Sous-Processus :
 - Phase : utiliser une machine pour transformer un lot.

Afin de relier un lot avec les procédés utilisés pour le transformer de son état initial vers celui attendu par le client, ce niveau de description n'est pas assez fin. Il propose le même degré de définition technique que les modèles par activités déjà présentés.

b) **Premier sous-système (Niveau 3)**

Un lot est composé de pièces. La part du lot, « pièce », vendue au client, est le résultat de transformations spatiales, temporelles et morphologiques successives d'un état initial, appelé « pièce brute ». Le brut est transformé en états intermédiaires, qui correspondent au résultat de sous-processus successifs appelés **sous-phases**.

Les pièces sont des produits, dont l'enchaînement qualifie leur environnement temporel, «gamme d'usinage» du sous-système « machine d'usinage ». A l'inverse, une pièce peut se définir comme l'état intermédiaire de ce sous-processus, soit un « en-cours » du système de Production.

D'un point de vue Flux – Stock, la pièce transite de son stock initial vers des montages où elle subit une transformation morphologique. Elle alterne donc elle-aussi transformations spatiales et temporelles avec une modification de sa forme.

Par contre, une pièce n'existe dans son intégralité que lorsque elle passe à l'état d'extrant du système. De-même, une pièce ne prend de sens physique qu'à partir du moment où elle est considérée par la série à laquelle elle est intégrée, un en-cours de fabrication de la production d'un atelier en l'occurrence.

Le second triplet [Sous-Processus – produit – ressource] identifié est donc :

- Ressource : « montage d'usinage » ;
- Produit : « pièce » ou « État Intermédiaire d'un en-cours » ;
- Sous-Processus :
 - Sous-Phase : utiliser un montage d'usinage pour transformer une pièce.

c) Deuxième sous-système (Niveau 2)

Les niveaux suivants de description de sous-système n'ont jamais été abordés dans les analyses génériques des systèmes de production. Les connaissances des disciplines du génie mécanique représentent l'assise des raisonnements à venir.

Une entité est par définition un « groupement sémantique (atome de modélisation) caractérisé par un ensemble de paramètres, utilisé pour décrire un objet indécomposable utilisé dans le raisonnement relatif à une ou plusieurs activités liées à la conception et l'utilisation des produits et des systèmes de production ». Une entité d'usinage est un cas particulier, défini dans [Bourdet 1990], par une forme géométrique et un ensemble de spécifications pour lesquels un processus d'usinage est connu.

Une entité d'usinage est un modèle géométrique regroupant un ensemble de surfaces nominales et des informations qui leur sont associées. Un exemple d'exploitation des entités d'usinage est proposé dans [Sabourin 1996]. Dans le cadre de la génération de gammes de fabrication assistée par ordinateur (pour des activités de prototypage du secteur de l'automobile), l'analyse de la pièce par les entités permettent d'identifier les séquences d'usinage à ordonnancer.

Les surfaces sont des produits, dont l'enchaînement qualifie leur environnement temporel, «séquence d'usinage» du sous-système « montage d'usinage ». A l'inverse, une surface peut se définir comme l'état intermédiaire d'une « entité d'usinage » de ce sous-système.

D'un point de vue Flux – Stock, la surface transite de son stock initial (matérialisé par une surépaisseur d'usinage) vers un ensemble outil et porte-outil où elle subit une transformation morphologique. Elle alterne donc elle-aussi transformations spatiales et temporelles.

Les surfaces, fonctionnelles ou non fonctionnelles, spécifiées sur un dessin de définition, n'existent dans leur intégralité que lorsqu'elles passent à l'état d'extrant du système.

Le troisième triplet [Sous-Processus – produit – ressource] identifié est donc :

- Ressource : « porte-outil » ;
- Produit : « surface » ou « État Intermédiaire d'une entité d'usinage » ;
- Sous-Processus :
 - **Opération d'usinage** : utiliser un porte-outil pour transformer une surface.

d) Troisième sous-système (Niveau 1)

Une surface est l'enveloppe des positions successives d'un outil le long d'une trajectoire (en usinage d'enveloppe), ou la trace laissée par une arête (en usinage de forme). Un copeau est le résultat d'une transformation morphologique d'une partie de la matière stockée dans les surépaisseurs d'usinage. Le sous-processus de transformation de la matière est appelé « enlèvement de matière ».

Les copeaux sont des produits, dont l'accumulation qualifie leur environnement temporel, «trajectoire» du sous-système « porte-outil ». A l'inverse, un copeau peut se définir comme l'état intermédiaire du « volume de matière » du sous-système « porte-outil ».

D'un point de vue Flux - Stock le copeau est « transporté » de son stock initial, un volume de matière situé dans une surépaisseur d'usinage, vers une arête de coupe où il subit une transformation morphologique. Il alterne donc transformations spatiales et temporelles. Un copeau n'existe dans son intégralité que lorsqu'il passe à l'état d'extrant du système.

Le quatrième triplet [Sous-Processus – produit – ressource] identifié est enfin :

- Ressource : « arête de coupe » ;
- Produit : « copeau » ou « État Intermédiaire d'une trajectoire d'usinage » ;
- Sous-Processus :
 - **Enlèvement de matière** : utiliser une arête de coupe pour transformer un copeau.

Dans ce modèle, le copeau n'est pas considéré comme un déchet des processus d'usinage. C'est un élément traité de ce sous-système, et un extrant du système de production. Ce sous-système est caractéristique du procédé et du mode de mise en forme du matériau.

Dans la suite de l'étude , les termes « arêtes de coupe » et « outil sont utilisés de façon équivalente, par abus de langage.

1.4.2.2) Systémographie

Le produit du processus modélisé à chaque niveau est une part de la production du système global. En analysant les relations entre les produits et les ressources, les activités de transformation morphologiques (partie des processus du système de production) « enlèvement de matière », « opération », « sous-phase » et « phase » aboutissant à l'obtention respective des produits « copeau », « surface », « pièce » et « lot » sont identifiées.

La figure (11) synthétise l'ensemble des produits, ressources et processus organisés en sous-systèmes.

- Niveau 1 : Transformation du matériau
- Niveau 2 : Transformation des surfaces
- Niveau 3 : Transformation des pièces
- Niveau 4 : Transformation des lots

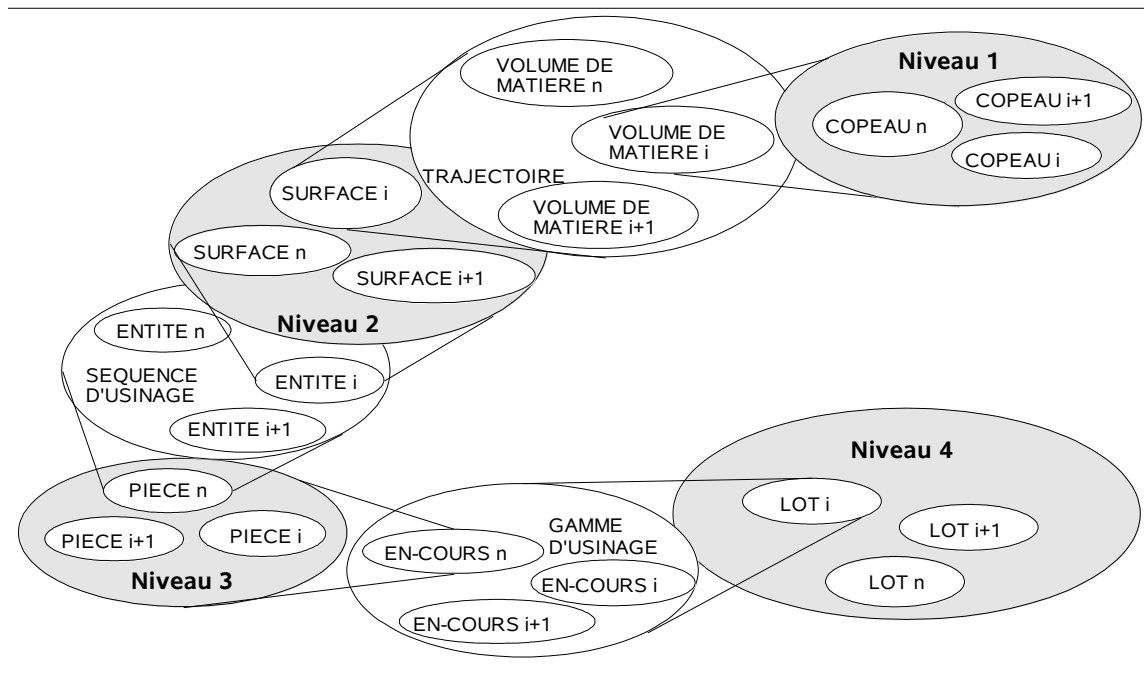


Figure 11 : Synthèse de la décomposition du système physique de production

Les éléments « trajectoire », « entité d'usinage » et « en-cours de fabrication » sont des modèles décrivant les environnements temporels des éléments processés et processeurs. Ils n'ont pas de sens physique en tant qu'intrant ou extrant du système physique de production.

1.4.3) Lien structure – fonction

La première partie du chapitre a montré que les modélisations de systèmes de production existantes ne proposaient pas un niveau de détail suffisant pour modéliser finement les technologies et organisations potentiellement affectées par l'évolution du procédé d'usinage. Cela se traduit principalement sur les modèles en terme de structure et de fonctions, liées aux transformations morphologiques.

Nous avons présenté la décomposition en quatre sous-systèmes du système physique de production. Ce paragraphe a pour but de présenter la construction du

modèle générique d'un sous-système. La structure s'appuie sur la propriété de la première loi d'évolution d'être fractale.

Le composant Action a été identifié pour chacun des sous-systèmes (cf. § 1.4.2). La forme générique, indépendante du niveau, de cette fonction est : **utiliser une ressource pour transformer un produit**. Les autres activités à identifier sont les équivalents du moteur, de la transmission et du contrôle.

Les modèles fonctionnels génériques, déjà présentés, ont permis de mettre en évidence deux classes de fonctions :

- Les fonctions génériques du système physique de production ont été exposées précédemment. Il s'agit de « Déplacer », « Transformer », « Contrôler » et « Supporter ».
- Le modèle GRAI recense les fonctions du système décisionnel : « Gérer les ressources », « Gérer les produits » et « Synchroniser ».

Pour que la transformation morphologique puisse avoir lieu, au moment du processus le bon couple Produit « brut » et ressource doit être en état de fonctionnement. Cela implique d'avoir synchronisé la gestion des produits et des ressources. Cette synchronisation dans le temps, des produits et des ressources, est le moteur de chaque sous-système identifié.

Le traitement de l'ordre par le moteur active la préparation des produits et ressources (transformation morphologique de la ressource et transformation temporelle), et leur transfert depuis leur stocks respectifs, l'un vers l'autre. Les trois analogies suivantes en sont déduites :

- **Moteur** : Commander et Lancer la ressource par rapport au produit, dans leurs environnements temporel et spatial. Elle correspond à la fonction « synchroniser » de GRAI, qui n'a été formulée que pour l'équivalent de notre Niveau 4.
- **Transmission** : Préparer et Transférer des ressources et des produits.
- **Contrôle** : Contrôler des produits et des ressources.

Les flèches, reliant les activités de la figure (12), modélisent des flux physiques ou d'informations. Celles arrivant ou partant du « moteur » sont des flux d'informations. Toutes les autres sont des flux matériels. Leur formalisation sera détaillés au cours du chapitre Deux. Par souci de lisibilité, nous limitons dans un premier temps, la quantité d'informations explicites des modèles.

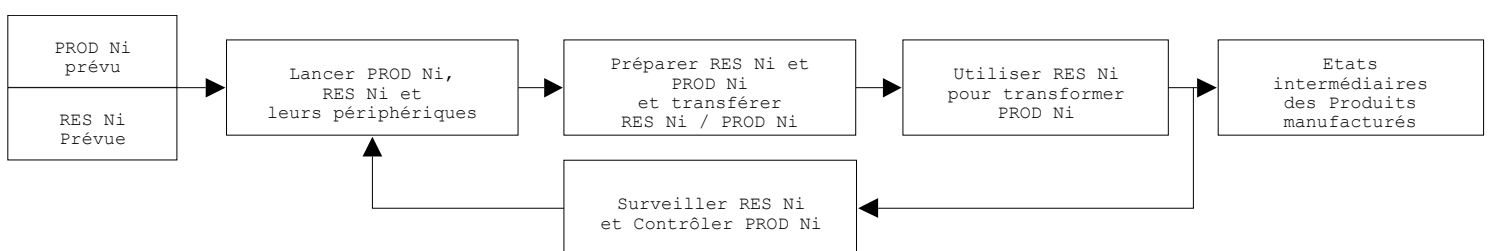


Figure 12 : Structure et fonctions de référence des systèmes de production

La transformation morphologique (activité « Action ») ne peut avoir lieu si auparavant les deux transformations spatiales et temporelles, sur les ressources et les produits initiaux, n'ont été correctement synchronisées. L'activité de synchronisation est modélisée par l'activité « Moteur » : le lancement de l'exécution de l'ordre.

Le lancement peut être corrigé en fonction du résultat de la transformation morphologique : défaut sur le produit intermédiaire ou dégradation de la ressource à ne plus répéter. La possibilité de correction est modélisée par l'activité de contrôle qui boucle sur l'activité de lancement. Comme dans le modèle de référence de TRIZ, il peut être possible de modifier plus en amont encore l'ordre à exécuter, et non pas seulement le lancement en lui-même (cf. figure (8)).

La structure, de la figure (12) peut être décrite avec un degré de détail supplémentaire. En effet, au cours d'un processus, il ne peut y avoir qu'un seul élément processé et un processeur. Or cette première formulation fait apparaître deux éléments processés. Pour montrer la dualité entre les produits et les ressources, les activités de préparation, transfert et contrôle peuvent être formulées indépendamment pour chacun.

- **Transmission :**

- Préparer la ressource et transférer la ressource dans celle du niveau supérieur ;
- Préparer le produit et transférer le produit vers la ressource du niveau.

- **Contrôle :**

- Contrôler le produit de la transformation ;
- Surveiller la ressource.

La figure (13) présente le modèle générique complet pour un niveau donné, résultat de la décomposition de l'activité Action du niveau supérieur.

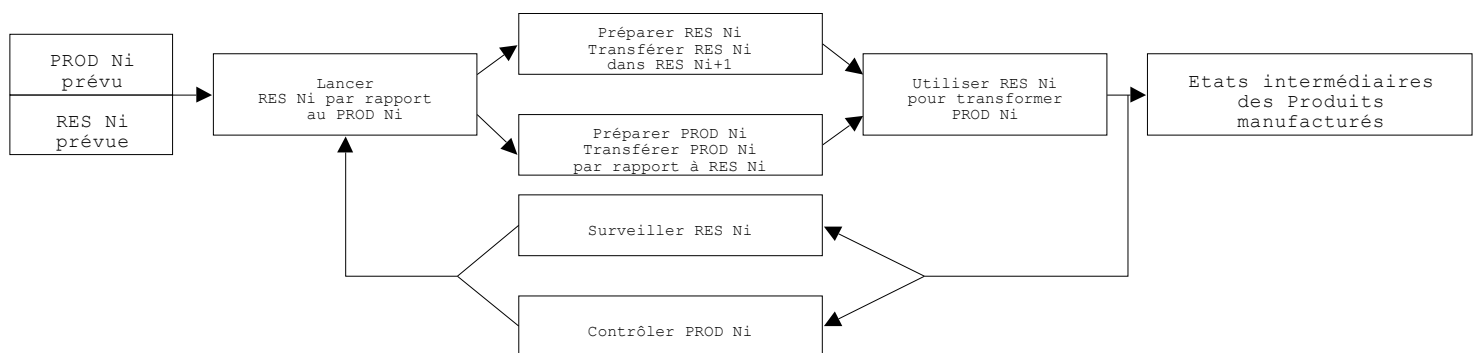


Figure 13 : Structure et dualité Produit/Ressource

Cette décomposition permet de présenter et de formaliser rapidement les résultats d'une analyse fonctionnelle du Système de Production. En effet, les activités sont dans ce modèle assimilées à des fonctions élémentaires à remplir pour que le système puisse produire. Cette simplification est cohérente avec les définitions données au §1.2.2, où il a été démontré qu'une activité peut être vue comme une

fonction qui transforme des objets d'entrée en objets de sortie, à partir de directives de contrôle. Les objets en question sont spécifiés globalement pour chaque niveau du système.

Il a été choisi de ne pas encore détailler les données particulières de chaque activité (bloc du modèle), pour se limiter aux concepts fondamentaux de l'usinage, et au besoin initial d'un outil de classement des divers apports recensés dans la littérature.

D'autre part, ce modèle propose un cadre de classification des solutions technologiques opérationnelles courantes. Leur étude est exposée dans le paragraphe 2 de ce chapitre (par les impacts de l'UGV) et dans le chapitre 2, sous les aspects économiques.

1.4.4) Modèle des Systèmes Opérationnels de Production (MSOP)

La définition des ordres est le dernier point à préciser. L'ordre est l'information qui, une fois émise, lance l'activité « moteur ». L'activation de l'ordre du niveau i ne peut être effective, que lorsque l'ordre du niveau $i+1$ a été transmis.

La figure (14) propose une synthèse du modèle générique, sous une formulation uniquement fonctionnelle. Elle montre la dualité de l'interaction produit-ressource au cours de processus identifiés de façon hiérarchique.

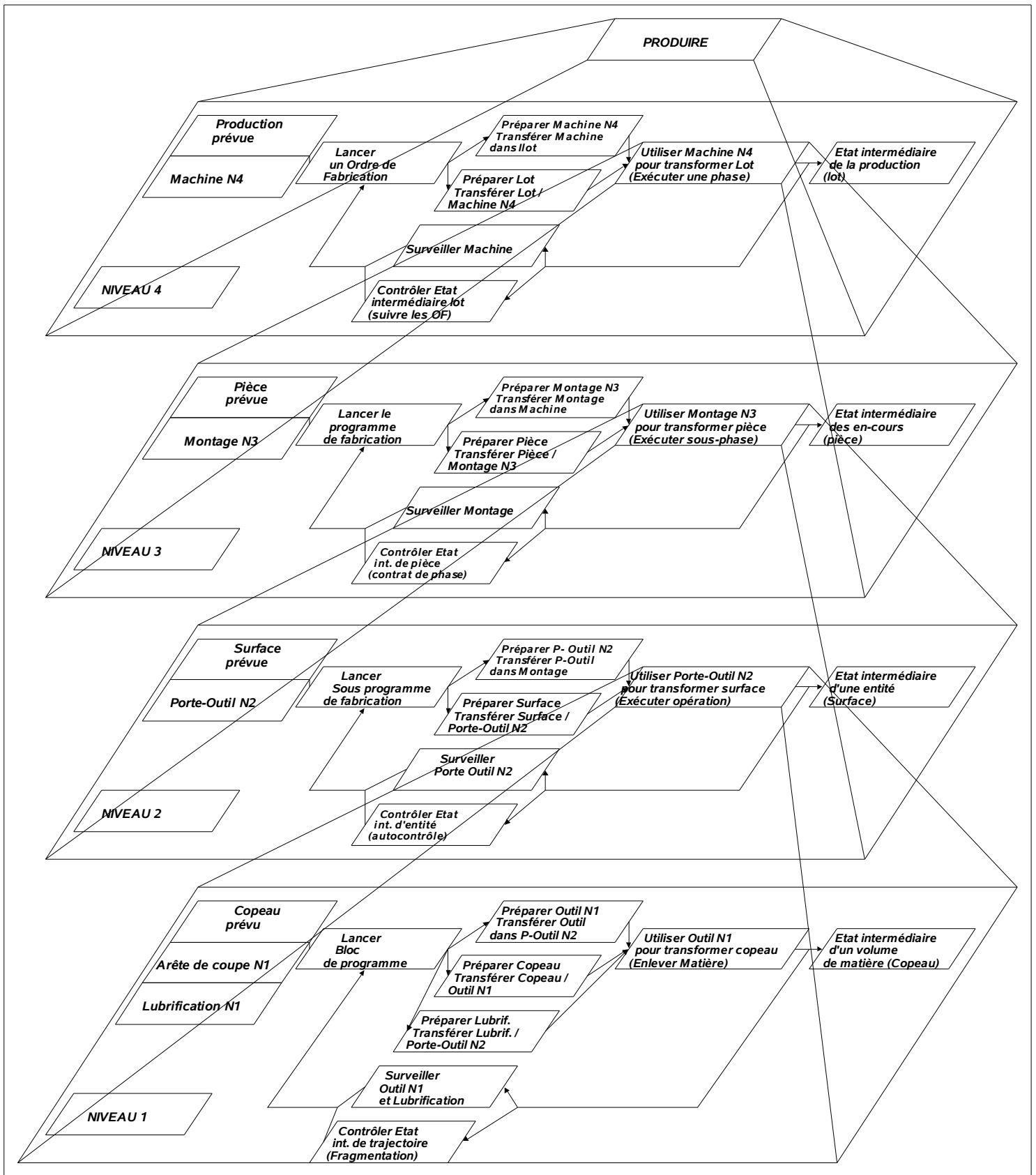


Figure 14 : Modèle des Systèmes Opérationnels de Production

1.4.5) Conclusion sur le modèle

Les limites et applications directes de ce modèle des Systèmes Opérationnels de Production sont présentées. Par abus de langage, les expressions « système de production usinant » ou « système usinant » sont désormais utilisées pour remplacer « système de production basé sur le procédé de coupe par enlèvement de matière ».

a) **Limites**

- Le MSOP ne prend pas en compte les sous-processus liés aux activités d'assemblage aux niveaux supérieurs. Son extension n'est pas dans l'intérêt immédiat de l'étude, orientée procédés de fabrication et non d'assemblage. Néanmoins, elle peut proposer un formalisme structure-fonction fractal, complétant les modèles tels GRAI.
- La décomposition des autres activités (Moteur, Transmission et contrôle), de chaque niveau, ne figure pas au centre de l'étude. Elle peut être envisagée pour formaliser les liens de façon encore plus formelle, avec les services tels que la logistique, la maintenance, la qualité, le service commercial, et les services généraux.
- Les interdépendances entre les niveaux n'apparaissent pas explicitement sur le formalisme, pour faciliter la compréhension du modèle. Pourtant, des couplages entre les activités existent ; la préparation des ressources en est un exemple. Pour compléter ce modèle en modélisant les liens entre les niveaux et entre les activités, nous proposons :
 - Une première approche de la modélisation des environnements temporels et spatiaux, dans le paragraphe 2.1, accompagné d'une proposition de formalisme.
 - Une modélisation orientée objet (en langage UML), à la fin du chapitre Deux.
- Les contraintes et nouvelles performances du système complet, suite à un changement de bloc à un niveau donné, sont toujours aussi complexes à prédire. L'évolution n'est pas caractérisée par ce modèle.

b) **Apports**

- **Application à l'introduction de l'UGV** : Classement des impacts du changement.

Modifier le processus de transformation morphologique impose d'adapter les solutions technologiques, traduisant les fonctions des activités en relation via le modèle. Les contraintes à répercuter sur les autres blocs en connexion directe sont très rapidement identifiables. L'étude bibliographique de ces impacts et leur formalisation sont développées dans le paragraphe 2 de ce chapitre.

- **Application au domaine de l'Usinage** :

Le MSOP permet de formaliser une partie des dépendances entre un défaut contrôlé sur le produit ou une défaillance de la ressource, détectée lors de leur surveillance, et les causes principales de ces dysfonctionnements du système.

• **Application à la compréhension de la Production :**

Cette modélisation a pour intérêt principal de faire le lien entre des activités propres à la génération de gammes d'usinage (choix de conditions de coupe, ordonnancement d'opérations de sous-phases et de phases) et celles liées à leur intégration dans un Système de Production : gestion des ressources associées, gestion des produits (définition et gestion des bruts de fabrication), et la synchronisation au niveau opérationnel de ces deux activités.

2) Impacts de l'UGV sur le système de production

L'identification des impacts de l'introduction de l'UGV, sur le système de Production existant, constitue le point d'entrée de la partie technique de l'étude. Pour parvenir à maîtriser les phénomènes physiques et les processus, les travaux de recherche en cours et les développements industriels sont multiples. Les approches systémiques ou managériales et les approches analytiques et numériques semblent chacune guider une partie de la communauté scientifique.

Le modèle des systèmes opérationnels de production est utilisé comme grille de lecture de la bibliographie pour l'analyse des impacts techniques. Le paragraphe 2.1 expose cette grille de lecture, en replaçant les processus liés au procédé d'usinage par enlèvement de matière dans leurs environnements.

Le paragraphe 2.2 présente ensuite la perception actuelle du procédé d'UGV. La connaissance des phénomènes et l'optimisation des solutions techniques y sont traitées. Les paragraphes 2.3 et 2.4 contribuent à formaliser les impacts techniques et managériaux de la technologie, afin de dégager leur niveau de prise en compte dans la méthode de conception.

2.1) Synthèse des processus et de leurs environnements

Le MSOP (Modèles des Systèmes Opérationnels de Production) a mis en évidence les processus suivant :

- Au niveau 1 : processus d'enlèvement de matière.
Il se caractérise par l'obtention d'un copeau, par l'action d'une arête de coupe.
- Au niveau 2 : processus d'opération d'usinage.
Il se caractérise par l'obtention d'une surface, par l'action de l'ensemble [Arête de coupe et Porte-outil].
- Au niveau 3 : processus de sous-phase d'usinage.
Il se caractérise par l'obtention d'une pièce, par l'action de l'ensemble [Arête de coupe, Porte-outil et montage d'usinage].
- Au niveau 4 : processus de phase d'usinage.
Il se caractérise par l'obtention d'un lot, par l'action de l'ensemble [Arête de coupe, Porte-outil, montage d'usinage et machine-outil].

Ces processus sont organisés au sein d'environnements temporels (ET) et spatiaux (ES), qui sont respectivement :

- La trajectoire d'usinage (ET12) et les positions relatives de l'arête de coupe et du porte-outil (ES12).
- La séquence d'usinage (ET23) et les positions relatives du porte-outil et du Montage d'usinage (ES23).
- La gamme de fabrication de fabrication (ET34) et les positions relatives du montage d'usinage et de la structure de la machine-outil (ES34).
- Le plan de production (ET4+) et les positions relatives de la machine-outil et de l'atelier (ES4+).

Les interactions entre produits et ressources dans les différents sous-processus et au sein de leurs environnements peuvent se représenter, comme sur la figure (15).

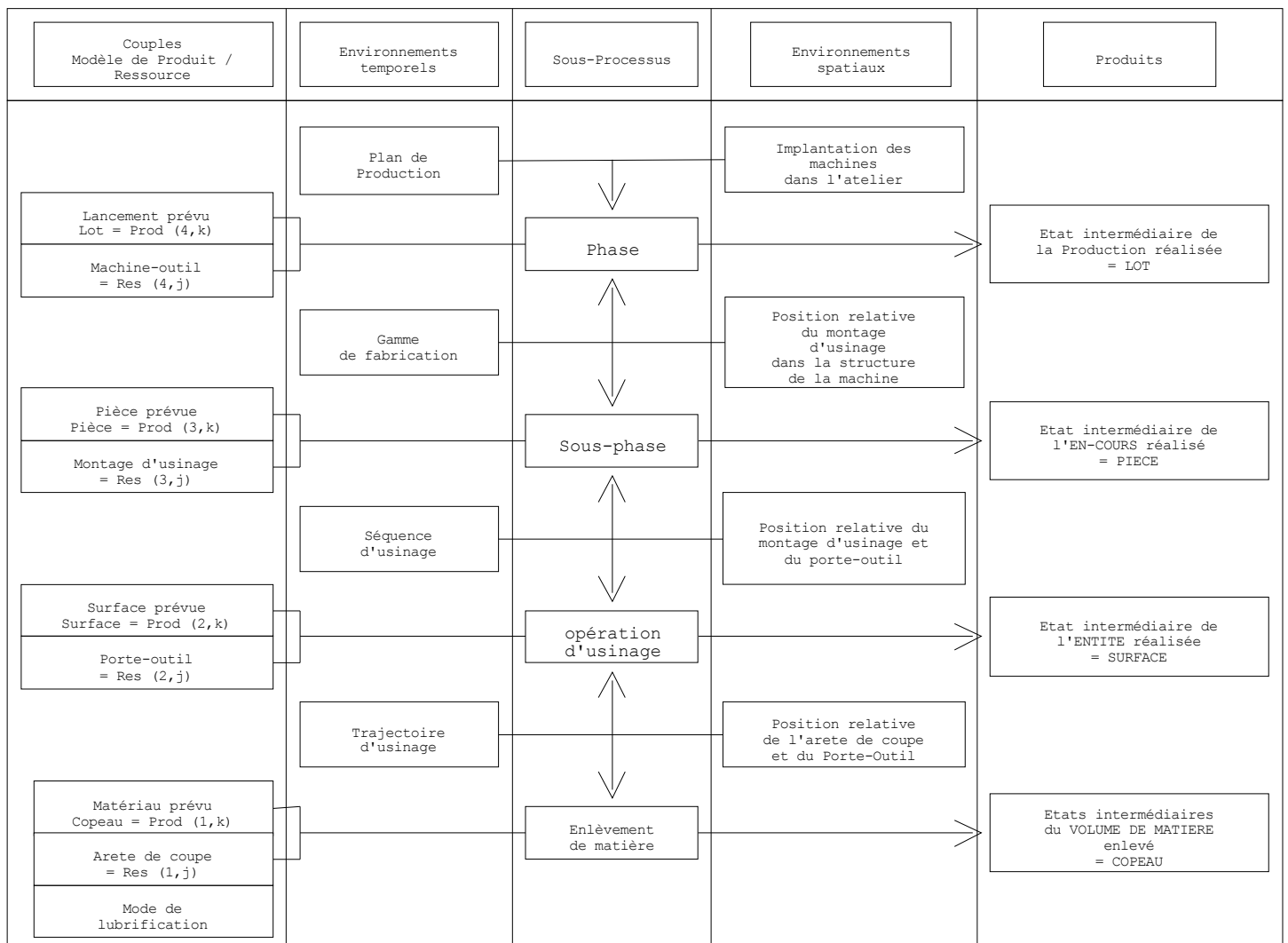


Figure 15 : Synthèse des sous-processus, environnements, produits et ressources

Aucun de ces sous-processus ou environnements n'est a priori à négliger, quant aux modifications possibles à répercuter, suite à une évolution du procédé

d'usinage dans un système de production. Les sous-processus et les environnements doivent être envisagés conjointement.

Développons le cas de l'interaction entre les niveaux 1 et 2. Pour ce faire, le matériau à transformer et le volume de matière à enlever, pour obtenir les copeaux et une surface, sont fixés. La trajectoire d'usinage va dépendre du choix combiné de la technologie de l'arête de coupe et du porte-outil utilisés. La proposition réciproque est également valable. Si la trajectoire d'usinage est imposée, alors la technologie de l'ensemble [Arête de coupe – Porte-outil] s'en déduit. Ces deux interactions dépendent elles-mêmes du type de montage d'usinage et de la séquence d'usinage dans lequel les processus ont lieu.

Les trois prochains paragraphes vont présenter en quoi ces activités, processus et environnements, formalisés par le MSOP, sont modifiés suite à l'introduction de l'UGV.

Dans un premier temps, les différentes visions de l'UGV, identifiées dans la littérature, sont présentées. Il s'agit de chercher à comprendre l'évolution des phénomènes entrant en jeu lors de la transformation morphologique de la matière en copeaux, caractéristique de l'usinage par enlèvement de matière.

La synthèse des impacts de l'évolution de cette transformation morphologique sur les autres activités, processus et environnements constitue la deuxième partie de cette étude bibliographique. Cette synthèse des impacts est mise en relation avec les nouvelles propriétés des produits (les copeaux, les surfaces, les pièces et les lots).

2.2) Le procédé UGV

Les multiples apports nous conduisent à envisager l'UGV non pas comme un procédé à part entière, caractérisé par un ensemble particulier de transformations morphologiques, mais comme une évolution possible des méthodes et moyens d'usinage actuels. En étendant la plage des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance par tour et profondeurs de passe), de nouvelles propriétés des produits obtenus, mais aussi des contraintes sur les ressources nécessaires, sont apparues.

Ce paragraphe a pour objet de présenter une synthèse bibliographique des divers travaux concernant les deux vues possibles de l'UGV. Les termes « vues ou perceptions » sont préférés à la notion de « définition ». En effet, aucun travail de normalisation des termes propres aux processus autorisant une définition consensuelle de l'UGV, n'a été rencontré. Les vues par le processus d'enlèvement de matière ou par la stabilité de l'usinage sont décrites dans la suite.

2.2.1) Vue par les processus : l'enlèvement de matière

Conformément au modèle fonctionnel présenté précédemment la définition suivante est adoptée : l'enlèvement de matière, soit l'obtention de copeaux, est la transformation de la matière par une arête de coupe le long d'une trajectoire.

Les différentes formes de copeaux ont été identifiées par [Komanduri 1982] : copeau continu, copeau segmenté, copeau catastrophique copeau discontinu. Ils ont été classés, par [Poulachon 1999], en fonction de la dureté du matériau usiné et de la vitesse de coupe. Ces formes sont illustrées sur la figure (16).

Une première constatation peut déjà être tirée de cette figure : les formes des copeaux peuvent être les mêmes, pour un matériau usiné identique, à faible vitesse de coupe, si sa dureté est suffisamment élevée, ou à grande vitesse de coupe, si sa dureté est d'autant plus faible.

Cette constatation peut être à l'origine du paradoxe autour de l'Usinage Grande Vitesse. Le tournage dur exploite des vitesses de coupe dont les ordres de grandeur sont inférieurs à 300 m.mn^{-1} , mais pour des aciers de dureté de l'ordre de 60 HRC, usinés avec un outil PcBN (Nitrure de Bore Polycristallin).

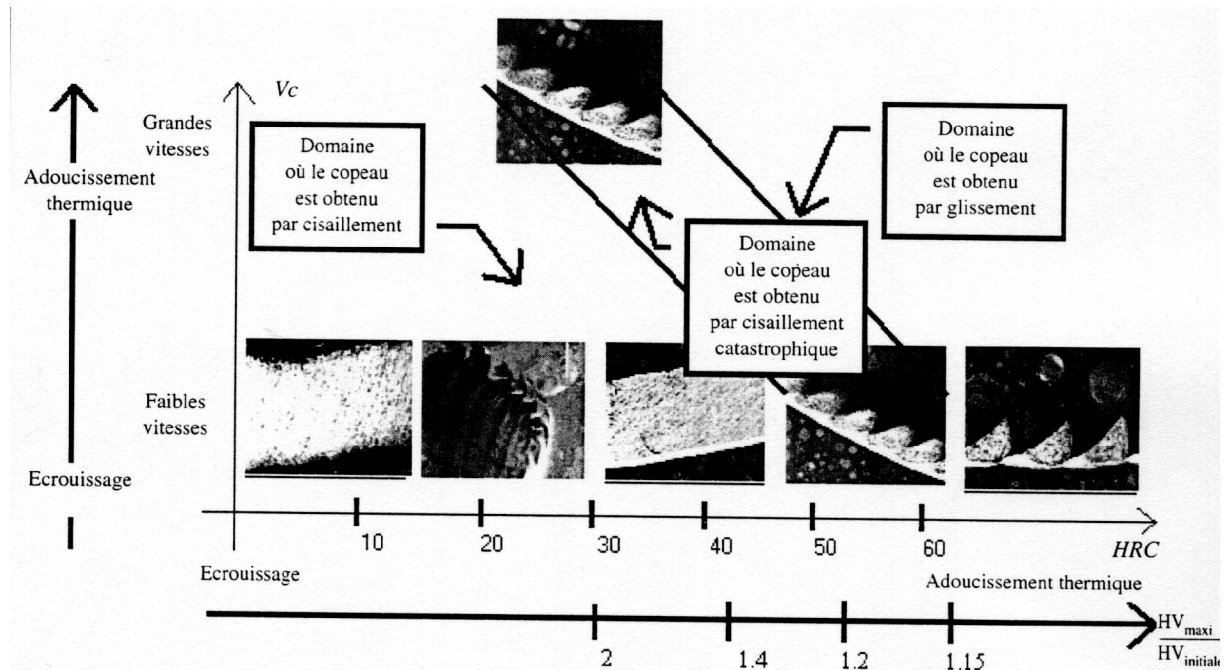


Figure 16 : Formes de copeaux en fonction de la dureté du matériau et de la vitesse de coupe [Poulachon 1999]

De telles conditions sont également employées pour un matériau comme le titane [Larrouquère 2004]. Les impacts technologiques et organisationnels, de l'exploitation de cette technologie (cf. 2.3), ont pourtant tendance à être comparés avec une application comme celle montrée dans [Fiorini 2004], dans un AS-7 non traité à 3000 m.mn^{-1} . L'Usinage Grande Vitesse ne sous-entend pas une grande vitesse de coupe, dans l'absolu, mais relativement à des propriétés mécaniques du matériau (sa dureté principalement).

Ce paradoxe sur les paramètres physiques trouve néanmoins une première explication consensuelle sur les phénomènes physiques, présentés dans ce paragraphe.

2.2.1.1) Coupe orthogonale

Dans cette configuration, l'arête de coupe est rectiligne, perpendiculaire au mouvement d'avance de l'outil (et les angles de direction d'arête K_r et d'inclinaison λ_s valent 90° et 0°) (figure (17)). Cette configuration de coupe n'a quasiment pas d'applications industrielles. Mais celle-ci est intéressante, par les simplifications géométriques et cinématiques qu'elle induit, pour l'étude des phénomènes apparaissant lors de la coupe [Altintas 2000].

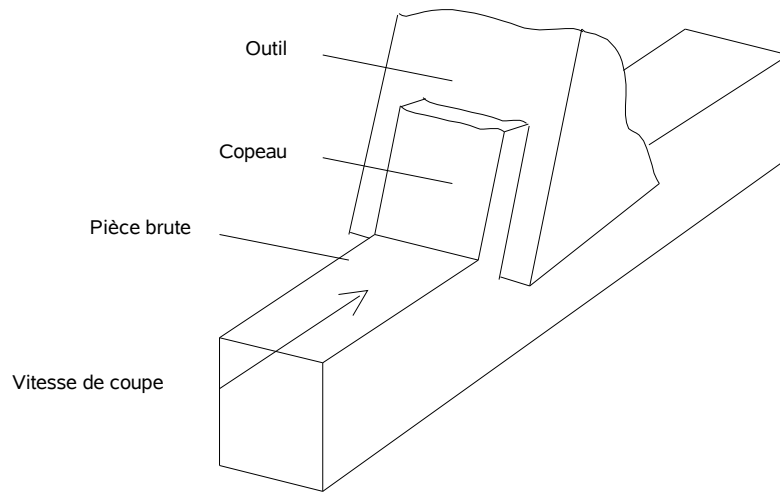


Figure 17 : Configuration de la coupe orthogonale

Les conditions de coupe se limitent à la vitesse de coupe et à l'avance par tour. L'épaisseur du copeau restant faible par rapport à sa largeur, et en exceptant les effets de bord, la coupe se modélise par un problème de déformations planes (les phénomènes entrant en jeu dans des plans perpendiculaires à l'arête de coupe sont identiques). En régime stationnaire et à vitesse de coupe constante, il est donc possible de tracer une représentation plane de la coupe.

Les apports des études concernant les configurations de la coupe oblique ou du fraisage sont abordées lors du paragraphe 2.2.1.4.

2.2.1.2) Zones de cisaillement en coupe conventionnelle

L'outil en avançant, cisaille un volume de matériau, la base du copeau en formation, compris entre la pointe de l'outil et la surface brute de la pièce (cf. figure (19)). Cette zone est le siège du cisaillement primaire qui assure la formation du copeau. Les cisaillements secondaire et tertiaire prennent place aux interfaces respectives entre le copeau et la face de coupe, et entre la pièce et l'outil. Ils sont dus à l'écoulement de la matière contre les faces de coupe et de dépouille de l'outil.

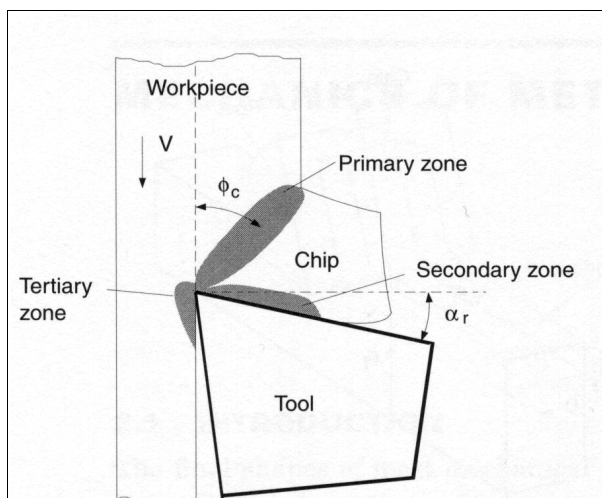


Figure 19 : Définition des zones de cisaillement à la formation du copeau [Altintas 2000]

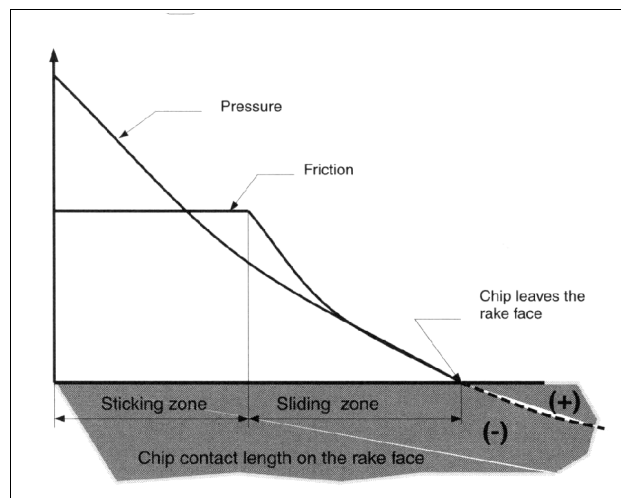


Figure 18 : Phénomène Stick-Slip à la formation du copeau [Altintas 2000]

La première zone de cisaillement (shear zone) est la première zone de déformation plastique mise en évidence dans le processus de la coupe. Elle succède à la zone morte où s'effectue le changement de direction de l'écoulement de la matière usinée, la séparation du métal en deux parties, dont l'une constituera le copeau, l'autre formant la pièce finie. L'effort dû au frottement et la contrainte tangentielle sur l'outil évoluent suivant le contact entre le copeau et la face de coupe. Les deux zones sont représentées sur la figure (18) :

- Dans la première (la « sticking zone »), il y a adhérence entre le copeau et l'outil ;
- Dans la seconde (la « sliding zone »), il y a glissement jusqu'au décollement du copeau.

L'ensemble de ces deux surfaces de contact définissent la seconde zone de cisaillement au sein du copeau. Le matériau y subit une plastification, due au frottement de glissement entre la face de coupe et le copeau [Altintas 2000].

Globalement, les grandes déformations se font par des glissements plans unidirectionnels, faisant donc un angle constant avec la vitesse de coupe. De plus, en se rapprochant des zones d'interface, les bandes montrant les alignements dans la texture du copeau se resserrent ; le cisaillement s'intensifie, comme si l'outil s'opposait à l'écoulement du métal. A cette interface le matériau subit une forte élévation de température. La formation d'austénite à l'intérieur de cette zone est caractéristique de l'usinage d'un acier faiblement allié 32 CrMoV 13 [M'Saoubi 2002].

En conclusion, le phénomène fondamental, en coupe classique, est un glissement plan unidirectionnel pseudo-périodique. Le résultat est un copeau entièrement plastifié et peu fragmenté.

2.2.1.3) Discontinuités au sein du copeau lors de sa formation en UGV

Pour les aciers, les copeaux dentelés et discontinus apparaissent dans des gammes de vitesses de coupe comprises entre 250 m.mn^{-1} et 1000 m.mn^{-1} . La formation des copeaux continus (obtenus entre 30 et 100 m/min) est expliquée par les phénomènes décrits dans le paragraphe précédent.

Une des premières études approfondies de ces modes de formation est proposée par [Le Calvez 1995]. Le couple outil-matière suivant est choisi pour l'analyse des phénomènes microstructuraux :

- Une pièce en acier faiblement allié 32 CrMoV 13 (acier de nitruration utilisé dans l'aéronautique), trempé et revenu à différentes duretés (170, 270, 370 Hv) ;
- Un outil en CERMET, de nuance ISO HT-P10, qui est un mélange de carbures de titane (TiC), de nitrure de titane (TiN), et carbure de molybdène (Mo₂C), avec un liant à base de cobalt et de nickel ; $V_c=700 \text{ m.mn}^{-1}$, $f=0,2 \text{ mmtr}^{-1}$.

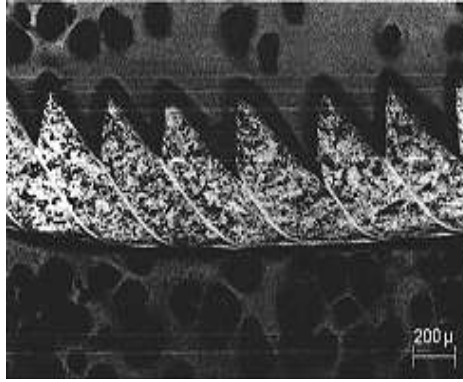


Figure 20 : Section d'un copeau dentelé [Le Calvez 1995]

Ce couple a été choisi parce qu'il donne lieu à des transformations métallurgiques significatives et stables dans une large gamme de variations des paramètres de coupe. La figure (20) montre le type de micrographies longitudinales des copeaux dentelés obtenues.

Sur la zone de frottement entre l'outil et la face de coupe, une bande blanche se distingue et juste au-dessus, une zone sombre fortement écrouie. La partie du copeau ainsi décrite forme la zone secondaire de cisaillement. De cette zone partent des lignes d'alignement de défauts qui s'incurvent pour devenir parallèles à celles issues du cisaillement primaire.

Cette zone, originellement introduite par Merchant dans [Merchant 1945], avec la notion de plans de cisaillement, fait un angle Φ avec la vitesse de coupe. Au-dessus de la zone secondaire de cisaillement, apparaissent des discontinuités de coupe, des zones de cisaillement plus ou moins fort.

Des mesures ont été obtenues en faisant varier des paramètres tels que la vitesse de coupe, l'avance par tour, la dureté du matériau. L'épaisseur de la zone secondaire garde une proportion constante de la largeur du copeau. Soit 4 à 10% de celui-ci. La périodicité des discontinuités peut être caractérisée par la distance entre deux crêtes successives du copeau. Les coefficients de la relation empirique, qui se trouve être linéaire, reliant cette distance à la vitesse de coupe (elle ne varie pratiquement pas avec l'avance) dépendent des propriétés du matériau de la pièce et de l'outil.

Les créneaux sont les marques de changements de régime de cisaillement qui mènent à un copeau discontinu. Cela s'accompagne d'une variation de la direction du plan de cisaillement. Les dimensions relatives des deux zones varient elles aussi avec la vitesse de coupe, pour un matériau de dureté donnée et pour un outil connu. Plus la vitesse de coupe augmente, plus la zone de cisaillement fort devient étroite.

[Komanduri 1982] propose une interprétation de ces variations de contraintes à l'intérieur du copeau dentelés (ou copeaux à zone de cisaillement localisé). Son modèle est représenté sur la figure (21). La formation de ce type de copeau se divise en deux phases ; lors de la première, la matière est aplatie à l'avant de l'outil, sur une très faible surface réellement en contact avec la face de coupe ; la déformation est alors très localisée dans la première zone de cisaillement. La deuxième étape est marquée par une instabilité plastique, provoquant le cisaillement, qualifié de catastrophique.

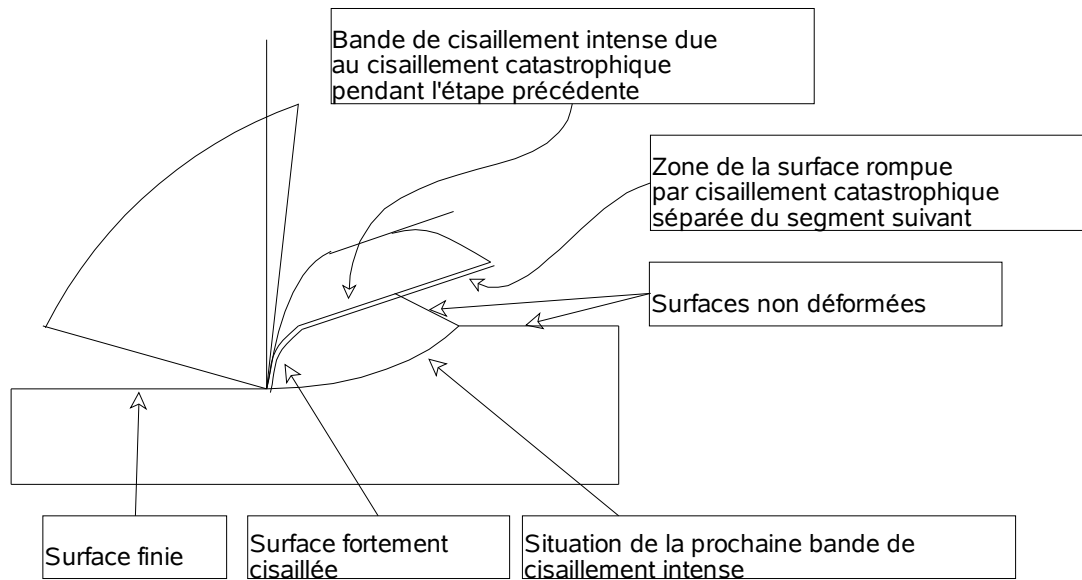


Figure 21 : Copeau à zone de cisaillement localisé [Komanduri 1982]

Par exemple, pour un acier AISI 4340 (35 NiCrMo 6, équivalent français), de dureté 325 HB, ce phénomène apparaît au-dessus de 275 m/min. Les essais ayant été réalisés sur des centres d'usinage de cinématiques différentes, pour des résultats similaires, ces phénomènes semblent être indépendants de la structure de la machine (ce dernier paramètre est négligé dans le cas des copeaux continus), dans la configuration de la coupe orthogonale. En effet, la fréquence de formation du copeau aux vitesses élevées est beaucoup plus grande (de l'ordre de plusieurs kHz) que la fréquence de résonance de n'importe quel élément de la cellule d'usinage (généralement très inférieure à 1 kHz).

L'instabilité plastique impose une grande accumulation d'énergie calorifique, qui dépend des propriétés thermomécaniques du matériau (conductivité thermique, chaleur spécifique, masse volumique...). Elle n'est possible uniquement parce qu'aux grandes vitesses de déformation, la chaleur emmagasinée, principalement due au taux de déformation élevé dans ces bandes très étroites, n'a pas le temps de se dissiper. L'absence de transfert thermique entre la pièce et l'outil tend à imposer au processus des conditions adiabatiques pour la transformation. De plus, il n'y a pas de phénomène oscillatoire, concernant les contraintes ou les températures durant la formation de copeaux discontinus [Burns 2002].

La formation de copeaux discontinus ou dentelés, caractéristique de l'enlèvement de matière avec des vitesses de coupe élevées, est due à un cisaillement adiabatique irréversible [Schulz 1989].

Komanduri a attribué son origine à une instabilité plastique. Ce dernier point ne fait pas l'unanimité. Par exemple, Herbert Schulz attribue plus d'importance au frottement outil/copeau. Suite à la chute par glissement d'une lamelle de copeau, le matériau en contact avec la face de coupe est refoulé. Les contraintes thermiques sur la face de coupe sont alors importantes. Ce refoulement de la matière donne naissance (phases c, d et e sur la figure (22)) à une nouvelle zone de cisaillement et la décohésion locale du matériau provoque une élévation localisée de la température. Les propriétés mécaniques dans cette zone s'en trouvent diminuées et le cisaillement a lieu. La naissance de la fissure permet le glissement de la lamelle, puis sa chute.

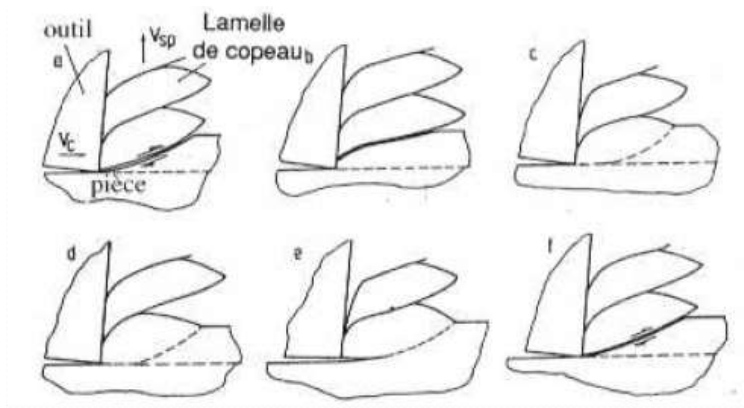


Figure 22 : Modélisation de la formation du copeau par [Schulz 1989]

2.2.1.4) Limites de la vue processus

Les modèles présentés dans le paragraphe précédent, certes aident à comprendre les phénomènes et dégager les paramètres clé, mais sont limités en termes de quantification des grandeurs : efforts de coupe, usure d'outil, températures... « Les relations fondamentales entre les variables du process (efforts sur les outils, températures et contraintes) et les performances de l'outil (durée de vie et intégrité des surfaces) peuvent être appréhendées plus efficacement en simulant le processus d'enlèvement de matière » [Fallbohmer 2000].

Depuis les premiers travaux de Merchant, une quantité considérable de modèles comportementaux ont été développés : [Pantalé 1996], [Dawson 2002], [Remadna 2001], [Komanduri 2000], [Molinari 1999], [Le Maitre 1999], [Le Calvez 1995], etc... Ils peuvent être classés en approches analytiques, expérimentales ou numériques [Pantalé 1996] :

- Modèles analytiques mécaniques de coupe orthogonale ;
- Modèles analytiques thermomécaniques de coupe orthogonale ;
- Modèles numériques lagrangiens ;
- Modèles numériques eulériens ;

Toutefois, ils se limitent toujours à de la coupe orthogonale, voire coupe oblique. L'étude des différents modèles ne fait pas l'objet de ce travail bibliographique, orienté sur les impacts de la technologie sur le système opérationnel de production.

La modélisation de la coupe en conditions « industrielles », notamment en fraisage, n'est pas encore totalement fiable et industrialisable. La combinaison d'une modélisation numérique en coupe orthogonale et de résultats d'expérimentation en fraisage est une première approche permettant l'évaluation des contraintes et températures au sein de l'outil. La précision et la généralité des résultats (souvent estimés pour un couple outil-matière donné) restent encore à améliorer [Fallbohmer 2000].

D'autres approches expérimentales, basées sur l'étude micrographiques des copeaux dans diverses conditions de coupe, tentent d'apporter d'autres éléments de

compréhension des phénomènes complexes. Par exemple, [Ning 2001] observe une grande sensibilité de la formation du copeau à son environnement, en fraisage de surfaces complexes. Dans son étude de l'usinage de moules en acier (55 HRC en moyenne) et de fontes, il synthétise les paramètres influant la formation du copeau :

- Les caractéristiques du matériau de la pièce : structure métallurgique, propriétés thermiques, plasticité ;
- Les conditions de coupe ;
- Les variations du cisaillement dans la première zone de cisaillement
- Le frottement sur la face de coupe ;
- Les interactions entre les deux zones de cisaillement
- Les caractéristiques dynamiques de la machine-outil.

Les conditions présentées en coupe orthogonale ne sont plus forcément valables dans le cas du fraisage en bout, avec des fraises cylindriques ou sphériques. L'influence de l'environnement est telle que le cisaillement adiabatique peut même disparaître, pour un mode de coupe « conventionnel », ou le copeau est simplement cisailé, sans discontinuités. Dans cette situation, les modèles de coupe orthogonale statiques, ou en conditions stationnaires, montrent leurs limites sur la prédiction des phénomènes.

L'influence de l'environnement du sous-système, décrit par le processus d'enlèvement de matière, se matérialise par des variations dans la stabilité de l'arête de coupe. La nature discontinue et périodique de la coupe en fraisage est la cause de vibrations systématiques, dites vibrations forcées, dans la cellule élémentaire d'usinage [Peigne 2003]. Ainsi, la vue « processus » limite la prise en compte de la dynamique de la coupe.

La vue « système », basée sur une étude fréquentielle de la machine-outil, est une approche complémentaire, introduite depuis l'avènement des machines à dynamique élevée.

2.2.2) Vue système : stabilité de l'usinage

Une illustration du phénomène d'instabilité de la coupe est proposée par [Ning 2001]. Le copeau montré sur la figure (23), correspondant à la configuration d'usinage de la figure (24), ressemble à un copeau dentelé. En réalité, il est de type continu, mais les vibrations de l'arête de coupe ont provoquées les variations de sa section.



Figure 23 : Copeau et surface obtenus en coupe instable

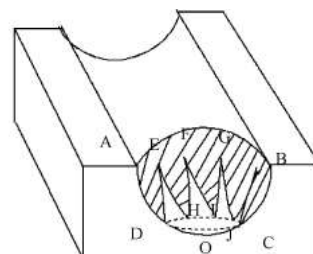
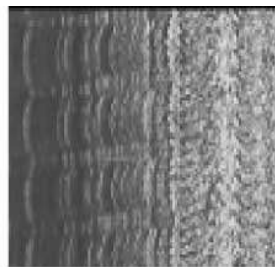


Figure 24 : Schématisation du comportement vibratoire de l'outil

[Peigne 2003] synthétise la description de ce phénomène. Les vibrations auto-entretenues, aussi appelées auto-vibrations ou vibrations régénératives proviennent de l'instabilité de la coupe dans certaines conditions de coupe. Ces vibrations naissent :

- Des variations de la nature du contact entre l'outil et le copeau ;
- Du frottement sur la face de dépouille de l'outil et de la variation de l'épaisseur de matière enlevée ;
- De l'excitation vibratoire de la structure de la machine, qui en retour entretient les fluctuations de ces phénomènes.

La figure (25) illustre un modèle de référence de ce phénomène de vibrations régénératives, qui sert de base à des modèles :

- mécaniques, destinés à comprendre le comportement des ressources,
- géométriques, destinés à la prédiction des propriétés des produits.

Les résolutions de ces modèles sont basées sur des développements analytiques ([Altintas 2000], ou [Insperger 2003] par exemple) ou numériques ([Peigne 2003], [Arnaud 2002]). [Lapujoulade 2002] montre que les développements numériques sont moins restrictifs quant aux hypothèses de validité.

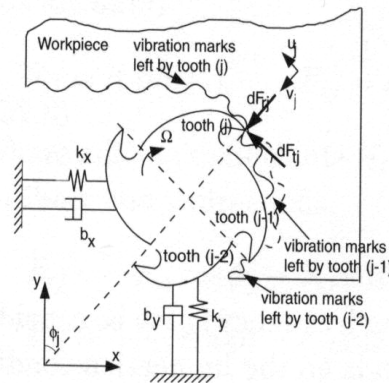


Figure 25 : Modélisation des vibrations régénératives [Altintas 2000]

Ces vibrations néfastes pour la coupe sont la principale cause du broutement [Arnaud 2002]. Elles apparaissent quand la machine-outil n'a plus la capacité de suivre la dynamique imposée par la coupe. Les autres causes du broutement sont synthétisées par [Peigne 2003] ou [Blanchard 2004], comme :

- Le phénomène de régénération de la surface et le couplage des modes ;
- La variation du plan de cisaillement en fonction des angles instantanés de coupe et de la pente de la surface en aval de la dent ;
- Le frottement à l'interface outil-copeau ;
- le talonnage.

Le modèle des lobes de stabilité explicite les zones d'usinage stable et instable. Il est présenté sur la figure (26), tirée de [Peigne 2003]. En abscisse, se trouvent les rapports de la fréquence de rotation de la broche et de la fréquence propre de la pièce et en ordonnée, les rapports entre la raideur de la coupe et la raideur de l'outil.

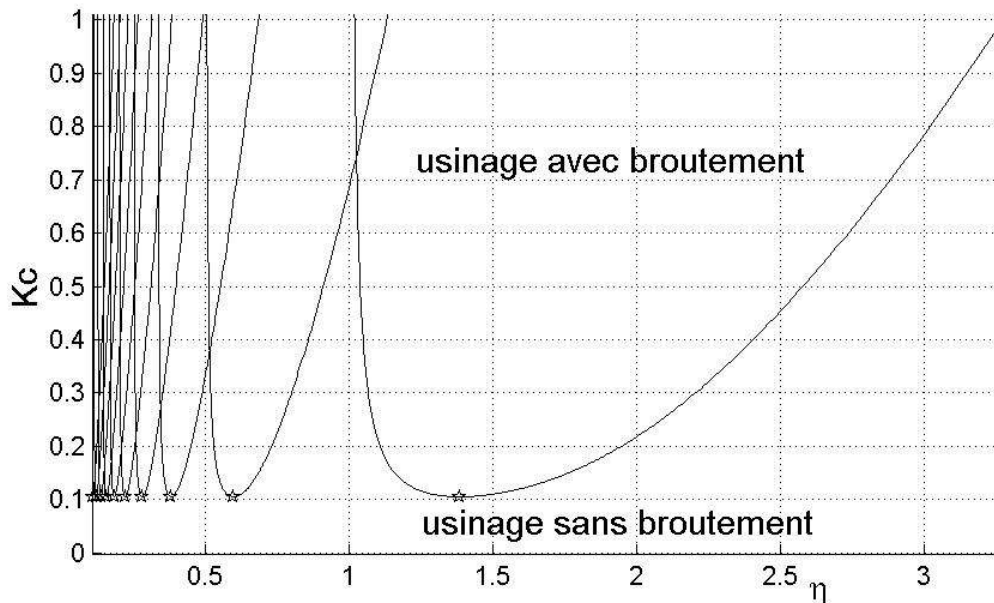


Figure 26 : Lobes de stabilité [Peigne 2003]

Un exemple parmi les résultats pratiques de cette modélisation, pour l'instant valables uniquement pour une configuration d'usinage donnée, en trajectoire rectiligne et à engagement de l'outil connu, est fourni par [Blanchard 2004]. Il se place dans le cadre de l'optimisation des conditions d'usinage de poches dans des alliages légers. Il y est montré que la maîtrise de l'engagement radial de l'outil, permet de transposer les résultats obtenus pour les trajectoires rectilignes, à des poches à fond plat. L'assurance de stabilité autorise alors des enlèvements de matière plus importants, en conservant la même qualité des parois.

Les applications de cette vue systémique sont centrées sur les applications de fraisage où le rapport des fréquences de rotation utilisées et de la fréquence propre est compris entre 0,5 et 1,5, où les gains en débit de copeaux peuvent être considérables. L'essor de l'usinage des parois minces en est l'illustration : la fréquence propre de la pièce est proche de la fréquence d'excitation de l'outil. Pour les configurations de pièce rigide, l'usinage est théoriquement stable, quelle que soit la vitesse de rotation de l'outil.

Comme ces approches ne se limitent pas à l'étude de l'unique sous-processus d'enlèvement de matière, elles offrent la possibilité d'étendre le domaine de recherche vers la prédiction des propriétés des produits aux autres niveaux du système. Contrairement à l'approche « processus » encore réservée à la modélisation des copeaux, la vue « système » permet, par exemple, de simuler la qualité des surfaces. Des simulateurs ont été développés dans cet objectif par [Dugas 2003], [Larue 2003], [Peigne 2003], et [Paris 2003].

2.3) Impacts sur les produits et les ressources

Ce paragraphe a pour objet de proposer une grille de classement pour le classement des impacts de la technologie d'Usinage Grande Vitesse sur les produits, les ressources et les environnements recensés en §2.1. Elle doit permettre, par l'étude bibliographique de mettre en relation les limites, à un instant donné, sur :

- La qualité des produits fabricables ;

- Les contraintes sur les ressources à intégrer.

2.3.1) Qualité des produits

Dans un premier temps, une proposition de cadre de formalisation des critères de qualité des produits usinables est exposée. Elle s'appuie sur la combinaison du Modèle des Systèmes Opérationnels de Production introduit précédemment et d'une analyse bibliographique.

Puis, sur la base de cette grille de classement, sont synthétisées les limites actuelles de l'Usinage Grande Vitesse pour les applications de mécanique générale. L'usinage des pièces en fonte sert de support à l'étude bibliographique des critères de qualité des produits des quatre sous-processus du MSOP.

2.3.1.1) Critères de qualité du produit

La qualité peut se définir comme « l'ensemble des caractéristiques d'une entité qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés et implicites », selon [Collignon 1997] et l'ISO 8402 de 1994, puis de l'ISO 9000 [ISO 9000 2000]. Les éléments sur lesquels reposent la satisfaction du client sont :

- La qualité du produit exprimée en termes de propriétés attendues (performances techniques), de conformité au stade de livraison, et de performance à l'usage ;
- La qualité des services d'accompagnement, à savoir l'adéquation de ces services aux attentes, la garantie et le service après-vente ;
- La qualité des délais mesurée par la disponibilité à la commande, ou le délai de production et la conformité à la date de livraison promise ;
- L'image du produit et de l'entreprise, comparativement à ses attentes et à l'image des produits et des concurrents du marché.

De cette définition générale, les caractéristiques du produit, de chaque sous-processus d'un niveau donné, pour les systèmes de production « d'usinage » peuvent être identifiées :

- **La précision du produit** : soit la conformité à des spécifications « techniques » ;
- **Le délai de production** et la conformité à la date de livraison promise.
- L'image et les services ne sont pas directement concernés par les impacts techniques. Comme ils sont plutôt relatifs à des approches stratégiques, ils font l'objet du paragraphe 2.4.

La modélisation a permis également de démontrer que « changer, c'est affecter la position d'au moins un objet dans le référentiel Temps – Espace – Forme ». La position du produit, de chaque sous-processus d'un niveau donné, s'est donc vue modifiée suivant chacun des trois axes du référentiel TEF. Les deux approches (gestionnaire et systémique) peuvent être mises en cohérence de la manière suivante, illustrée sur la figure (27) :

- Le délai de production constitue la variation de la coordonnée sur l'axe des Temps ;

- La variation $df2$ admissible de la position autour de la valeur cible $f2$ sur l'axe de la « Forme » qualifie la précision du produit. Les classes de spécifications techniques affectées par la notion de précision, peuvent donc être affinées pour chacun des quatre produits.

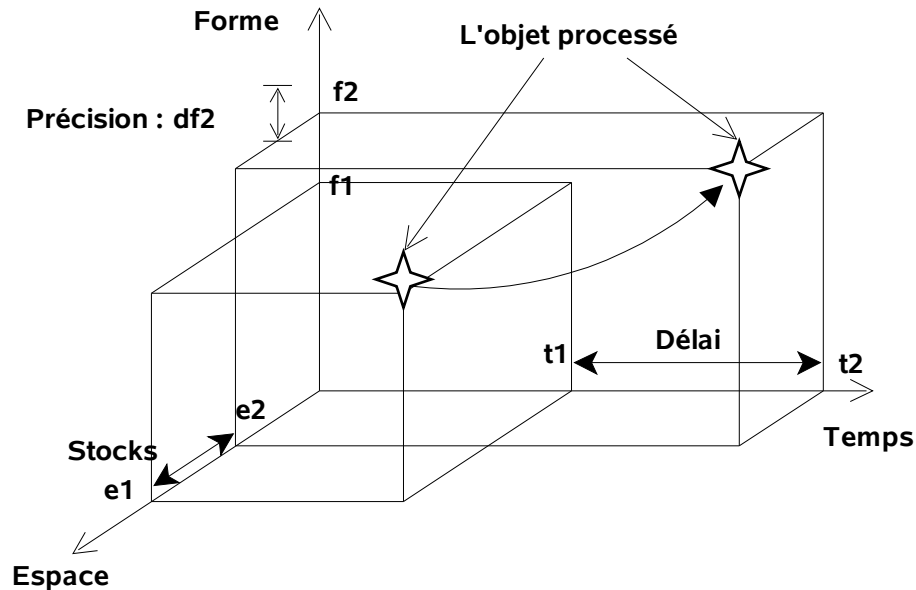


Figure 27 : Critères de qualité dans le référentiel TEF

La forme (ou morphologie) constitue la description géométrique de chaque produit. La variation de la coordonnée suivant « l'Espace » est relative aux propriétés des stocks de l'objet processé. Le signification traditionnelle du stock est acceptée pour le dernier niveau du modèle : stock de lots. Pour les trois premiers, le « stock » ne peut se trouver qu'au sein même de la pièce : le volume de matière à enlever ou formant l'objet final représente la matérialisation de ce concept. Les propriétés de cette interprétation d'un stock sont ainsi reliées aux propriétés thermomécaniques de l'objet.

La plage d'erreur admissible pour le respect de la conformité de ces spécifications techniques et temporelles (ou position dans le référentiel TEF) est modélisée par des tolérances affectées à chacune d'elles. Les tableaux (2) et (3) montrent notre proposition de classement des critères de qualité, pour les quatre types de produits formalisés. Ces classes sont issues de l'instanciation des critères de qualité recensés, aux produits du système. Elles relèvent de la connaissance générale du domaine de l'usinage : formalisation de pratiques industrielles, normes internationales, synthèse bibliographique.

Des définitions sont données dans les cas où des concepts classiques ont été transposés dans un domaine connexe (pour les délais, par exemple). A chaque type de critère correspondent également des références bibliographiques, où sont données des définitions ou des applications (non exhaustives bien sûr), pour le domaine des procédés d'usinage.

Niveau	Produit	Classe de critères de qualité du produit		Grandeur à quantifier ou Définition	Référence bibliographique
1	COPEAU	Description géométrique intrinsèque	Géométrie	Rayon de courbure, volume	[Schulz 1989] [Fallbohmer 2000]
			Stabilité	Mode de formation et fragmentation	
		Thermomécanique	Température de formation		
			Structure métallurgique		
Délai d'obtention	Intervalle de temps compris entre le moment où le copeau précédent est formé et celui où le copeau en cours est achevé				
2	SURFACE	Description géométrique intrinsèque	État de surface	Arrachements	[Lopez de Lacalle 2002] [Feng 2000] [Duc 1998] [De Souza 2003] [Dawson 2002]
				Défaut de rugosité	
				Défaut d'ondulation	
				Défaut de forme	
			Tolérances dimensionnelles	Dimensions linéaires	
				Dimensions angulaires	
		Thermomécanique	Température de formation		
			Dureté		
			Contraintes résiduelles		
		Délai d'obtention	Intervalle de temps compris entre le moment où le dernier copeau de la surface précédente est formé et celui où le dernier copeau de la surface en cours est achevé		

Tableau 2 : Critères de qualité pour les copeaux et les surfaces

Niveau	Produit	Classe de critères de qualité du produit	Grandeur à quantifier ou définition	Référence bibliographique
3	PIECE	Tolérancement géométrique	Défauts d'orientation	[Alam 2000]
			Défauts de position	[Yang 2001]
			Défauts de battement	[Cay 1997]
		Thermomécanique	Caractéristiques mécaniques (déformations globales)	[Paris 2003]
			Température de formation	
Bavure	Projection indésirable de matière au-delà d'une arête de la pièce due à une déformation plastique pendant l'usinage			
Délai de fabrication	Intervalle de temps compris entre le moment où le dernier copeau de la dernière surface de la pièce précédente est formé et celui où le dernier copeau de la dernière surface de la pièce en cours est achevé			
4	LOT	Description géométrique	Rebut	[Zhang 2002]
		Stocks	Niveau des stocks	[Besnouin 2002]
		Délai de fabrication	Intervalle de temps compris entre le moment où le dernier copeau, de la dernière surface, de la dernière pièce du lot précédent est formé et celui où le dernier copeau, de la dernière surface, de la dernière pièce du lot en cours est achevé.	

Tableau 3 : Critères de qualité pour les pièces et les lots

2.3.1.2) Exemple d'une pièce en fonte

Les raisons de la restriction du domaine d'étude de la qualité des produits usinables en UGV sont les suivantes :

- A notre connaissance, peu de travaux scientifiques lui sont encore consacrés, en comparaison avec les pièces en acier (domaine de l'outillage) ou en alliages non ferreux (domaines de l'aéronautique ou de l'automobile) ;
- Les pièces en fonte représentent justement une majeure partie de la production de l'industrie de la mécanique générale ;
- L'application industrielle présentée dans le dernier chapitre de cette étude (avec la société SEW USOCOME) a lieu dans un atelier de fabrication de carters en fonte ; de la fonte à graphite lamellaire plus exactement.

La figure (28) permet de proposer un positionnement de la fonte (Cast Iron sur la figure (28)), par rapport aux autres matériaux traditionnellement usinés. Contrairement aux alliages non ferreux, les alliages fer-carbone ne présentent pas de baisse significative de la température de formation du copeau avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Usiner aux hautes vitesses de coupe pour cette classe de matériaux impose donc l'utilisation de nuances de coupe spécifiques, assurant une durée de vie de l'arête de coupe industriellement viable.

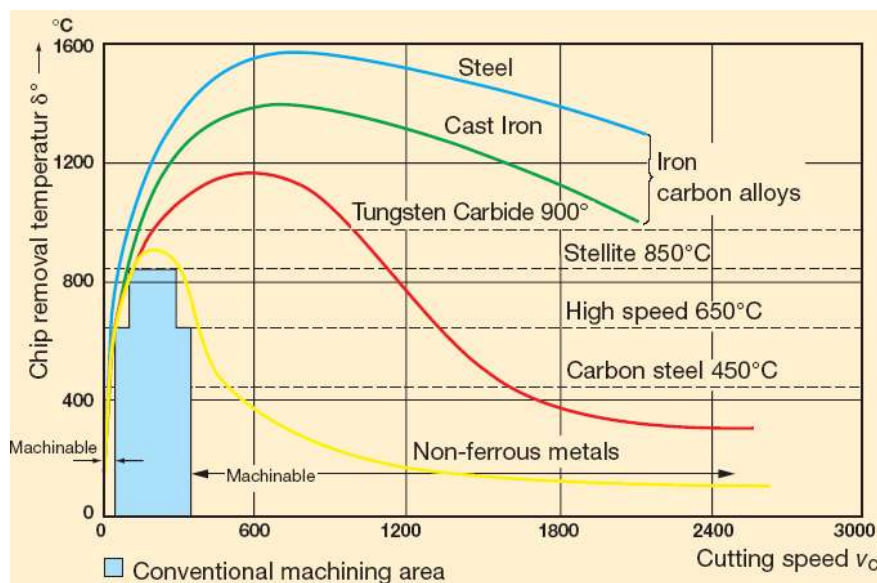


Figure 28 : Températures de formation des copeaux pour les grandes classes de matériaux [Sandvik 2002]

Les caractéristiques des produits usinés pour cette classe de matériaux sont présentées dans la suite, en se limitant à celles des copeaux et des surfaces, et des pièces. En effet, à cette étape de la thèse, ce n'est pas directement le procédé d'UGV qui modifierait les propriétés des lots, mais l'ensemble des équipements mis en œuvre (ressources et moyens de préparation, de transfert, de maintenance...).

a) Qualité du copeau

Comme il a été formalisé dans le Modèle des Systèmes Opérationnels de Production, le copeau, en tant que produit de l'enlèvement de matière par une arête de coupe, dépend fortement de ce couple. Suivant la grille de classement proposée en § 2.3.1.1, l'influence de l'UGV se matérialise au travers des trois classes suivantes.

- La description géométrique intrinsèque du copeau : Géométrie et Stabilité.

Il ne peut pas se former de copeau continu, mais uniquement un copeau de « cisaillement ». Sa formation se base sur la propagation d'une fissure née de l'hétérogénéité de la structure. Avant la chute par glissement sur la surface de coupe, les segments sont complètement séparés les uns des autres. Ils se soudent ensuite, compte tenu de l'élévation de température [Schulz 1989].

Avec l'élévation de la vitesse de coupe (au-delà de 1000 m/min), les copeaux se brisent sur des longueurs plus courtes. Les segments de copeaux ne présentent plus qu'une faible cohésion entre eux.

- Sa thermomécanique : Température de formation et Structure métallurgique.

La figure (28) a montré l'augmentation de la température avec la vitesse de coupe. Au delà de 600°C, les matériaux « classiques », principalement les nuances K de l'ISO [ISO 513 2004], voient leur durée de vie s'écrouler. Des nuances de revêtement telles les Ti Al N (Nitrure de Titane), ou Si N (nitrure de silicium), et des inserts de PCBN (Nitrure de Bore cubique polycristallin) garantissent des durées de vie au moins trois fois plus longues [Fallbohmer 2000].

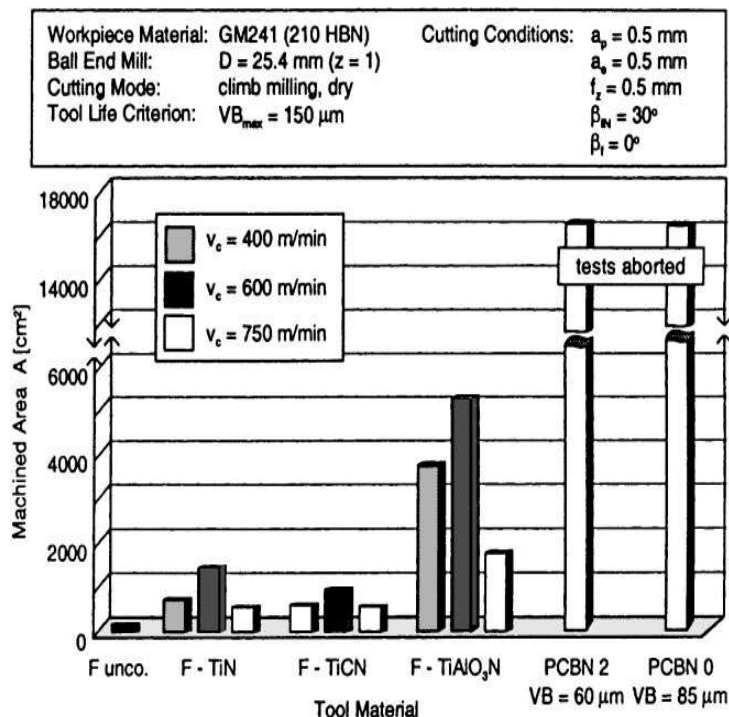


Figure 29 : Aire usinée en fonction du matériau outil pour une fonte [Fallbohmer 2000]

- Son délai d'obtention.

Le délai de formation d'un copeau est nécessairement plus court qu'en usinage conventionnel. En effet, sa fragmentation est plus intense, de par la faible cohésion des lamelles formées. La vitesse de coupe est en outre multipliée par trois au minimum (passant de 250 m.mn^{-1} à plus de 750 m.mn^{-1}).

b) Qualité des surfaces

- État de surface final

Dans le cas des fontes à graphite lamellaire, l'obtention de surfaces est caractérisée par la formation d'écailles. Elles sont dues à la présence de lamelles de graphite qui croisent la surface de coupe. Les inclusions de graphite s'étendant perpendiculairement à cette surface sont recourbées dans le sens de la coupe.

On en arrive à un déplacement de glissement de la matière le long des lamelles. Un déplacement relatif se produit au sein du matériau qui se traduit par le dépôt d'une couche de graphite à la surface de la pièce. La formation d'écailles a pu être constatée dans toute la gamme de vitesses de coupe allant de 10 à 4000 m/min ; la fréquence des écailles augmentant avec la vitesse de coupe [Schulz 1989].

De Souza, dans [De Souza 2003], a mesuré l'évolution de l'écart arithmétique de rugosité (R_a) dans le cas du surfaçage de bloc moteur en fonte grise, en conditions industrielles (secteur automobile), en fonction du nombre de pièces produites. La figure (30) montre l'évolution de la grandeur suivant la série de pièces, pour deux types de porte-outils et de plaquettes (systèmes A et B). L'optimisation des conditions d'utilisation des ressources (type de bridage, équilibrage...) peut conduire à une rugosité de l'ordre $0,2 \mu\text{m}$. Comme pour l'acier, la qualité de la surface obtenue après un usinage à grande vitesse est équivalente à celle issue d'une phase de rectification.

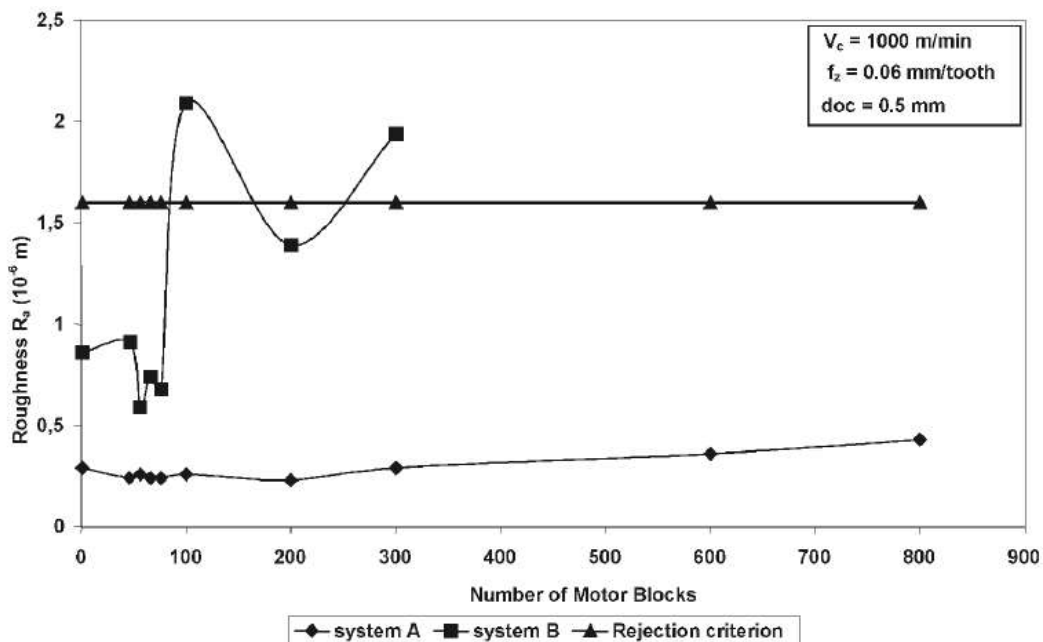


Figure 30 : Rugosité en fonction du nombre de pièces produites [De Souza 2003]

Une autre étude, présentée dans [Lopez de Lacalle 2002], est consacrée à l'usinage d'outillage en fontes à graphite lamellaire ou nodulaire, avec des fraises hémisphériques monoblocs en carbures revêtus, ou à insert, en carbures revêtus ou en PCBN. La figure (31) illustre les Ra obtenus sur une pièce représentative de l'entreprise support de l'étude, et les erreurs dimensionnelles relevées

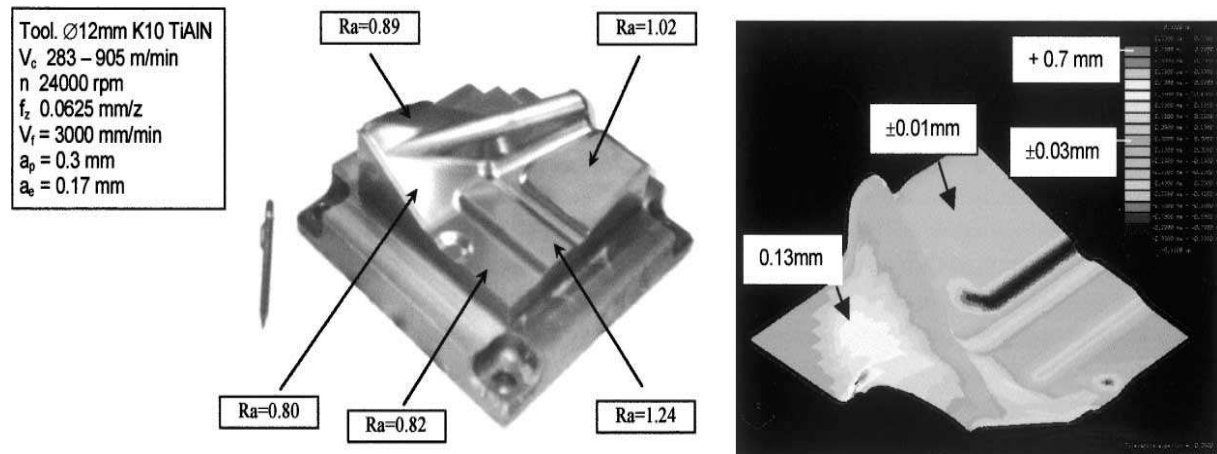


Figure 31 : Rugosité et défaut de forme pour un outillage de forge en fonte [Lopez de Lacalle 2002]

La valeur de la rugosité dépend fortement de la stratégie d'usinage choisie ainsi que du montage utilisé pour l'ensemble outil et porte-outil. Le processus de transformation est donc bien très sensible aux environnements spatiaux et temporels, comme formalisés au §2.1.

- Précision dimensionnelle

Il vient d'être démontré que pour les surfaces gauches, les opérations d'Usinage Grande Vitesse conduisaient à l'obtention de meilleurs écarts de rugosité, qu'en conditions « conventionnelles ». L'influence des phases de reprises manuelles sont ainsi diminuées sur la précision finale de chaque surface. Le fait de pouvoir diminuer la quantité de matière à enlever manuellement permet d'améliorer la concordance avec le modèle géométrique nominal, quantifiée par le défaut de forme de surfaces complexes [Duc 1998].

Cet impact est une conséquence directe de la formation du copeau, donc caractéristique du procédé. Cela ne peut être généralisé à toutes les surfaces, notamment les surfaces dites 2 axes $\frac{1}{2}$. En effet, pour celles-ci les progrès sont également notoires, mais plus difficilement attribuables à la formation du copeau. La rigidité des structures des machines-outil, les performances de l'asservissement des axes de déplacement sont autant de paramètres supplémentaires impliqués.

- Aspects thermomécaniques

La température de la surface est normalement constante lorsque les conditions d'Usinage Grande Vitesse sont atteintes. Comme il a été montré au §2.2.1.3, la coupe tend à devenir adiabatique. Une très grande proportion de la chaleur est évacuée dans le copeau.

Les changements possibles de microstructure à la surface extrême de la pièce, s'ils ont lieu, et les contraintes résiduelles sont dues à un écrouissage localisé de la couche superficielle. Suivant la conductivité thermique de l'outil, une partie de la chaleur générée pendant la coupe est tout de même absorbée par la pièce. Ses effets s'ajoutent à ceux de l'action mécanique du rayon de bec et de la surface de dépouille, sous la forme de talonnement de l'outil, sur la pièce. Les contraintes résiduelles naissent aussi à partir du moment où il y a des arrachements de matière.

Ces changements microstructuraux, de martensite en austénite, se matérialisent sur la micrographie de la figure (32), par la fine « couche blanche » visible sur une distance de 1 à 10 μm (la différence de couleur est simplement due à une attaque chimique) [Poulachon 2002]. Ce changement de micro-structure n'est pas systématique. Il varie avec les types de pièce (tournage ou fraisage), et l'outil utilisé (nuance et géométrie), suivant une grande sensibilité [Dawson 2002], [Remadna 2001]. Une faible modification des paramètres de coupe permet donc d'éviter cette modification indésirable.

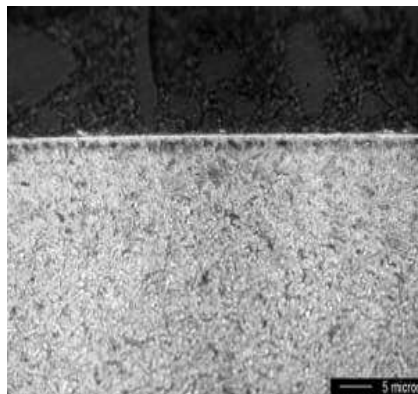


Figure 32 : Micrographie montrant la couche blanche [Dawson 2002]

Le niveau des contraintes de surface croît avec la vitesse de coupe et l'avance. La profondeur du gradient de contraintes augmente en plus avec la dureté du matériau. L'écrouissage de la surface suit l'augmentation de l'avance et dépend de la nature du matériau de coupe. En prenant des vitesses de coupe supérieures, la profondeur écrouie est diminuée. C'est pourquoi, le frottement joue un rôle fondamental pour les propriétés mécaniques finales de la pièce. Mais l'inaptitude des modèles existants à le traiter rend la prévision de l'état final difficile à établir.

- Délai d'obtention de la surface

Concernant l'intervalle de temps alloué à la transformation morphologique, inclus dans le délai d'obtention d'une surface, il dépend du volume de matière à enlever, comme formalisé dans le MSOP, et du couple trajectoire / porte-outil choisi. Il est évidemment lié au débit de matière réel. A notre connaissance, aucune étude dédiée spécifiquement à l'optimisation du délai, pour les pièces en fonte n'a été recensée. L'évidence de la réduction des délais, démontrée pour les longs trajets des surfaces complexes composant les outillages en fonte, comme [Fallbohmer 2000], n'est plus flagrante pour les surfaces des pièces de mécanique générale.

c) **Qualité des pièces**

Parmi les critères recensés (défauts géométriques, grandeurs thermomécaniques, bavures et délai de fabrication), l'analyse de la littérature ne permet de dégager d'influence de l'UGV que sur la formation des bavures, pour les pièces en fonte. Les variations des autres critères ne peuvent être imputées uniquement à la formation du copeau. A noter tout de même, que le fait de diminuer la quantité de matière à enlever manuellement permet également d'améliorer la précision des défauts géométriques des surface gauches (pour un défaut de forme de surfaces complexes avec des références spécifiées).

Dans [De Souza 2003] la formation des bavures lors du surfaçage de carters de moteur est étudiée, en conditions industrielles. Les conclusions suivantes en sont issues :

- La longueur de la bavure augmente avec l'usure de l'outil, indépendamment de l'ensemble outil / porte-outil. Le fait que l'arête de coupe s'émousse en s'usant accentue les déformations plastiques à l'origine des bavures.
- La longueur de la bavure augmente avec une augmentation de la vitesse d'avance. Cela s'explique par l'augmentation des aires de contact entre le copeau et la face de coupe et entre l'outil et la pièce, induites par une hausse des efforts de coupe aux grandes vitesses d'avance.

d) Qualité des lots

Le fait d'éliminer des phases de rectification ou de reprises manuelles peut se traduire aussi (outre le gain de précisions géométrique et dimensionnelle) par la diminution du nombre de phases d'une gamme de fabrication. Les transferts entre postes de transformation sont moins nombreux ; proposition directement justifiée par le MSOP. Les risques de dégradation des lots lors de ces transferts sont alors restreints. L'absence de résultats quantifiés à ce sujet, dans la littérature, illustre la difficulté de formaliser des règles « métier » pour un procédé donné.

Les grandeurs telles le niveau des stocks ou le délai d'obtention ne peuvent être sujettes à une quelconque généralisation ; surtout pour les pièces de mécanique générale pour lesquelles une phase d'usinage n'est pas prépondérante par rapport aux autres (en termes de délais). Les contre exemples sont nombreux. Par exemple, le nombre de phases est diminué ; mais le nombre d'opération par sous-phase est augmenté ; d'autres contraintes comme la maintenance des équipements s'y superposent. Ces aspects sont détaillés dans la fin de ce chapitre.

2.3.1.3) Conclusion

A notre connaissance, les propriétés des produits considérées dans les études consacrées à l'Usinage Grande Vitesse, se limitent essentiellement à celles des copeaux et des surfaces. Les répercussions sur les caractéristiques des autres niveaux ne sont pas explicitement formalisées, lorsqu'elles existent.

Les études du domaine montrent que l'UGV permet indéniablement d'améliorer la précision de ces produits, en respectant (au moins dans les conditions de laboratoire) des délais de fabrication. Par contre, les performances techniques atteintes dépendent des domaines d'application, et la difficulté d'en généraliser les apports est réelle. Comme cela a été montré, la qualité des produits dépend des conditions d'utilisation des ressources, et l'influence des environnements est manifeste.

Dans un objectif de généralité, une grille de classement des performances de l'Usinage Grande Vitesse, en termes de qualité des produits, a été proposée et un exemple d'application à l'usinage des pièces en fonte a été développé sur cette base. D'autres critères de performance sont a priori à évaluer dans ce contexte : les enjeux économiques en sont un exemple. Les chapitres Deux et Trois y sont partiellement consacrés.

2.3.2) Conséquences sur les ressources

Les ressources du système de production ainsi que leurs environnements spatiaux sont choisis pour satisfaire les exigences de qualité des produits, présentées au §2.3.1. Ce paragraphe a pour objectif de présenter partie des solutions supplémentaires offertes aux Bureaux des Méthodes, dans leurs choix de conception des moyens de production. Il ne traite pas des aspects méthodologiques, qui sont abordés au cours du chapitre Deux.

L'intention, au delà de l'aspect veille technologique, est de montrer dans quelles mesures les résultats des travaux du domaine peuvent être utilisés, dans l'état actuel de la formalisation des connaissances en usinage. Dans un premier temps, parmi l'ensemble des impacts techniques, les enjeux et les classes de solutions liées à la surveillance des ressources sont recensés. En effet, de l'ensemble des activités identifiées dans le MSOP où les ressources sont impliquées, la surveillance des ressources est celle que l'homme peut le plus difficilement accomplir. Les vitesses de tous les composants vont bien au delà des possibilités de d'observation et de réaction des sens de l'opérateur [Furet 2002]. Aussi, les industriels cherchent particulièrement à développer des systèmes pouvant se substituer à leurs sens (la vue, l'ouïe, le toucher...). Le besoin est d'assurer la détection les problèmes de coupe par des moyens intégrés aux machines : les systèmes de surveillance automatique d'usinage [Furet 2002].

Puis, l'étude est menée des impacts à la fois des technologies utilisées et des procédures régissant leur utilisation, sur leur aptitude à s'adapter au changement de leur environnement (environnements temporels des processus). Paradoxalement, cette étude montre le manque de formalisation des grandeurs examinées pour qualifier ces impacts.

Enfin, des éléments de généralisation sont présentés. Ils mettent en valeur les manques actuels en termes de formalisation du domaine, auxquels cette étude vise à contribuer, mais aussi les points maîtrisés à ce jour.

2.3.2.1) Aspects techniques : surveillance des ressources

En règle générale, le système se détériore dès sa première utilisation, comme cela a été présenté au §1.2.3. Les produits et l'environnement exercent donc une réaction sur les ressources, qui ne peuvent plus garantir les performances pour lesquelles elles étaient initialement conçues.

La mauvaise utilisation des ressources conduits également à cette baisse de performance. Ainsi, comme le montre [Moraru 2004], les experts des constructeurs d'électrobroches constatent que 53 % des pannes sur ce composant proviennent d'un choc (collision avec le magasin d'outil ou sur la broche). Les autres 47 % sont répartis sur des défaillances des composants de la broche pendant son fonctionnement « normal » : défaillances des joints tournants, du joint central, des roulements,...

Parmi les quatre classes de ressources identifiées, l'arête de coupe est celle qui subit les sollicitations mécaniques (dues aux phénomènes de la coupe), dynamiques (dues aux chocs) et thermiques (dues au frottement entre le copeau et la face de coupe) les plus cycliques et intenses. Les difficultés relatives à sa maîtrise sont d'abord présentées, avant d'évoquer les différentes technologies de surveillance. Cette structure correspond aux modes de surveillance identifiés par [Furet 2002] : surveillance hors usinage ou pendant l'usinage.

a) Surveillance hors usinage de l'arête de coupe

Le respect des performances attendues sur les produits, passe notamment par la compréhension des mécanismes de l'usure. Surveiller hors usinage revient à comparer l'état de la ressource à un état de référence, considéré comme la limite acceptable. Il est donc nécessaire de pouvoir mesurer une grandeur sur l'outil à surveiller et de connaître la valeur limite acceptable. Ces deux activités s'appuient sur des approches expérimentales ou de modélisation des phénomènes.

En tournage et fraisage Grande Vitesse, l'usure de l'arête de coupe se manifeste suivant quatre modes, classés entre autres par [Liu 2002] dans le tableau (4).


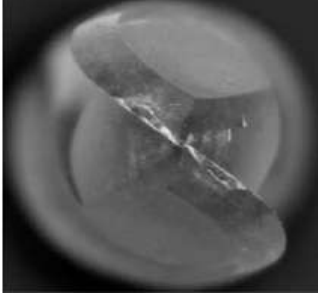

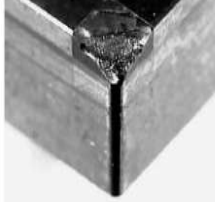
Modes d'usure des arêtes	Illustrations
<p>Usure en cratère sur la face de coupe</p> <p>C'est le phénomène dominant, observé dans les conditions de vitesse de coupe élevées. La face de coupe subit des efforts tangentiels (frottement du copeau en formation) et normaux (dus à la coupe), et des sollicitations thermiques provoquant la diffusion de la matière.</p>	 <p>Figure 33 : Usure en cratère d'une plaquette PcBN [Dawson 2002]</p>
<p>Usure en dépouille</p> <p>Elle est due au glissement de l'outil sur la surface usinée. Les mécanismes et la mesure restent classiques.</p>	 <p>Figure 34 : Usure en dépouille d'une fraise hémisphérique [Dolinsek 2001]</p>
<p>« Chipping » ou cassure en clivage</p> <p>Elle suit l'apparition de fissures dans dans la zone de coupe. L'ensemble des sollicitations peuvent la provoquer, notamment les chocs, surtout pour les matériaux à module d'élasticité très élevé.</p>	 <p>Figure 35 : Arête rapportée sur une plaquette PcBN [Dawson 2002]</p>
<p>Rupture de l'arête de coupe</p> <p>Particulièrement pour les matériaux à faible résistance à la rupture au cisaillement, et dans les situations de coupe intermittente.</p> <p>La surveillance de ce type de défaillance doit assurer la sécurité des opérateurs, pour éviter qu'une particule soit émise, à haute vitesse de coupe.</p>	 <p>Figure 36 : Rupture d'une plaquette PcBN [Liu 2002]</p>

Tableau 4 : Modes d'usure des arêtes de coupe en UGV

Les études empiriques considèrent le système actif comme une boîte noire (principes de la systémique). L'examen des produits (les copeaux) et des ressources (les arêtes de coupe), dans des conditions les plus maîtrisées et stables possibles est la méthode utilisée dans ce cas ([Liu 2002], [Farhat 2003], [Renevier 2003], [Dolinsek 2001], [Larrouquère 2004]). Ces approches sont adaptées à des études industrielles pour des applications précises, où le champ d'investigation est limité à un couple outil-matière donné.

Elles sont complétées par les modélisations analytiques ou numériques du phénomène de coupe. L'expérimentation est alors un moyen de validation de simulations. [Pantalé 1996] ou [Yen 2004] sont des exemples de cette approche. Le champ d'application étant souvent trop large, la complexité des modèles et la quantité de données à recueillir pour les appliquer limitent également leur déploiement.

Néanmoins, de ces deux types d'études, il ressort un consensus sur les points suivants :

- Les performances sur le produit sont améliorées [Farhat 2003] en augmentant les vitesses de coupe, et en adaptant l'arête de coupe utilisée.
- Tous les travaux relatent la grande difficulté de compréhension des mécanismes et de leur couplage :
 - modification des propriétés mécaniques (module d'élasticité, résistance à la rupture, coefficient de frottement) due à l'augmentation de la température,
 - diffusion de la matière de revêtement des outils dans les zones de frottement,
 - sensibilité aux chocs mécaniques (en fraisage) et thermiques,
 - modification de la structure cristalline du matériau de la pièce : des changements de phase sont observés dans le copeau,
- L'usure des arêtes de coupe n'est pas significative dans tous les couples de matériaux. Par exemple, elle est négligeable pour l'usinage des alliages d'aluminium [Schulz 1989], si les conditions de coupe et la lubrification sont adaptées.

Ainsi, les conditions optimales d'utilisation de l'arête de coupe ne peuvent être prédites de façon générique et fiable, dans l'état actuel des connaissances. La surveillance hors usinage doit donc faire l'objet d'une expérimentation préalable, pour déterminer les conditions d'acceptation des outils.

L'état actuel de la formalisation et de la modélisation, pour le comportement de l'arête de coupe, ne permet pas la construction de règles générales suffisamment précises pour faciliter la mise en œuvre de la surveillance hors usinage.

b) Surveillance pendant l'usinage

L'observation de l'outil hors usinage ne permet pas d'assurer une protection en cas d'incident pendant l'usinage. En revanche, une surveillance continue de l'outil pendant les opérations d'usinage permet à l'unité de conduite du poste d'être informée en temps réel, et de réagir rapidement de façon à limiter les dégâts éventuels [Furet 2002]. La figure (37) présente différentes implantations possibles de capteurs de surveillance d'usinage.

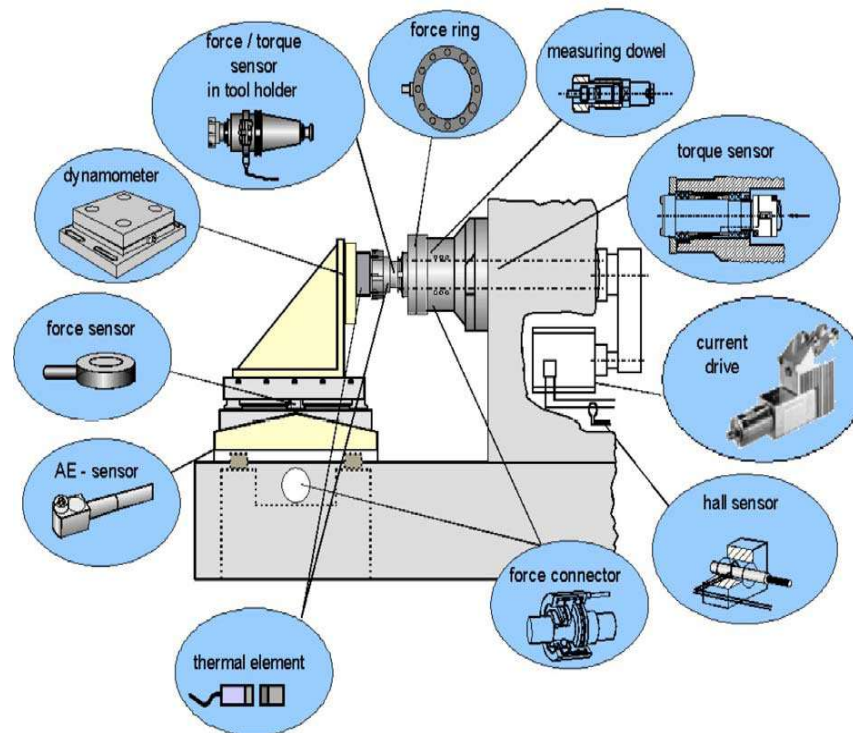


Figure 37 : Technologies de surveillance pendant l'usinage [Furet 2002]

Le but de ces systèmes de surveillance est de permettre des actions correctives, en faisant des manipulations des grandeurs, telles la vitesse de broche, les vitesses des axes, les jauges des outils, la compensation des positions réelles de la machine [Altintas 2000]. Ce sont des manipulations en temps réel. L'auteur qualifie ce type d'usinage, assisté par des capteurs « d'usinage intelligent ». De tels systèmes peuvent être intégrés à la structure de la machine-outil, dès sa conception, ou ajouté de façon modulaire par l'utilisateur, selon ses besoins spécifiques.

[Furet 2002] propose un cahier des charges idéal de ces systèmes, pour répondre à la problématique spécifique de l'Usinage à Grande Vitesse en fraisage. Les fonctions à remplir sont :

- être appliqué à la grande dynamique des machines,
- être un système de surveillance continue pendant l'usinage,
- être capable de détecter des bris d'outils et de réagir rapidement en conséquence,
- être capable de suivre l'usure des outils
- ne pas nécessiter d'apprentissages spécifiques longs et fastidieux.

Peu de travaux proposent une approche globale de la surveillance. L'arête de coupe n'est pas le seul composant à s'user. D'autres, tels les axes machine (spécialement le comportement des moteurs linéaires) ou les changeurs d'outil, peuvent provoquer des pannes critiques. Par exemple, le monitoring des vibrations de la broche doit éviter une dégradation de l'état de surface et un mauvais fonctionnement de la machine-outil [Kang 2003].

L'intégration de plusieurs informations est nécessaire pour améliorer l'efficacité de la surveillance, comme montré dans [Furet 2002]. Il propose un

système où les signaux de courant de broche pour une surveillance indirecte pendant l'usinage les efforts de coupe hors usinage sont pris simultanément en compte.

Dans tous les cas, comme montré dans [Spiewak 2001] dans le cas de la surveillance des broches, la connaissance insuffisante des paramètres physiques explique les divergences entre des résultats expérimentaux et théoriques. Il conseille lui-aussi de combiner les modèles théoriques avec des données obtenus « in situ », pour améliorer la précision de la mise en œuvre du monitoring.

2.3.2.2) Adaptation aux changements d'environnement

Les ressources et leurs procédures d'utilisation doivent assurer la qualité des produits, comme cela a déjà été évoqué, mais doivent également faire face aux fluctuations de la demande. La capacité du système de production à s'adapter à des modifications plus ou moins rapides de la demande externe définit le concept de flexibilité, selon [Giard 2003].

La flexibilité du système est obtenue, toujours selon [Giard 2003], en combinant deux approches :

- Flexibilité physique par l'utilisation de ressources (humaines et matérielles) polyvalentes,
- Flexibilité organisationnelle par l'amélioration des diverses procédures qui définissent les règles d'utilisation des ressources.

La synthèse de l'étude industrielle présentée dans [Besnouin 2002] relate que : « Pour les petites et moyennes séries et depuis plus de 15 ans, les ateliers constitués de centres d'usinage standards répondent aux besoins minimum de flexibilité demandés ». Dans [Cus 2001], l'auteur constate également l'augmentation de la flexibilité des équipements de production, dans son étude des choix de paramètres de coupe. Il en fait la grandeur critique de la production industrielle.

Pourtant, dans [Zhang 2003], l'auteur montre l'ambiguïté et le flou de la notion de flexibilité. Elle est à la fois difficile à qualifier et à quantifier. Il propose de distinguer la flexibilité externe et la flexibilité interne. Pour répondre à la flexibilité externe, le système de production doit mettre en place un degré de flexibilité interne suffisant. La flexibilité externe se caractérise par la flexibilité de volume et la flexibilité de variante, nécessaire pour satisfaire le client. Elles se définissent ainsi :

- La flexibilité de volume qualifie l'aptitude d'une organisation à obtenir efficacement différentes tailles de lots et/ou, à différents niveaux de la charge.
- La flexibilité de variantes qualifie l'aptitude d'une organisation à obtenir efficacement différentes combinaisons de produits, pour une capacité donnée.

Dans [Jack 2002] et [Bengtsson 2002], les auteurs étudient les conséquences de la flexibilité, imposées par les clients du système de production, sur les décisions managériales. Ces travaux montrent que les entreprises, investissant pour améliorer leur flexibilité externe, voient leurs performances économiques progresser. Ces choix managériaux seront considérés plus en détail par la suite.

Pour satisfaire à cette demande, l'état de l'art proposé dans [Zhang 2003] recense les grandeurs suivantes, caractérisant la flexibilité interne :

- Flexibilité des équipements : aptitude d'un équipement de production d'effectuer différentes opérations efficacement et économiquement.
- Flexibilité du personnel : aptitude des personnels à effectuer une large gamme de tâches de production efficacement et économiquement.
- Flexibilité de manutention : aptitude à transporter différentes références entre des centres de transformation morphologique suivant plusieurs chemins efficacement et économiquement.
- Flexibilité de routage : aptitude à transformer un ensemble donné de références suivant des flux différents efficacement et économiquement.

Étudier les impacts de l'UGV sur la flexibilité se ramène ainsi à considérer la variation de flexibilité des équipements, et leurs répercussions sur les trois autres classes. Peu d'études scientifiques proposent ce niveau de précision. [Gunasekaran 2002] propose, par exemple, une analyse a posteriori de l'introduction de centres d'usinage à Grande Vitesse dans une entreprise aéronautique. Mais, comme la plupart d'études de ce type, les aspects techniques se limitent à l'étude des implantations des cellules d'usinage, pour améliorer les flux et ainsi la flexibilité de volumes. Elles développent par contre les conséquences managériales en profondeur. Ces aspects sont étudiés dans le §2.4 de ce même chapitre.

Confrontons cet état de l'art avec le modèle des systèmes opérationnels de production. Bien que les demandes de flexibilité de volume et de variante (correspondant aux niveaux 4 et 3 du modèle) soient largement prises en compte, celles liées aux matériaux (niveau 1) et surface (niveau 2) ne sont pas explicites. Ces quatre classes de flexibilité pourraient ainsi permettre de caractériser plus précisément la flexibilité (interne) des ressources liées à l'UGV : aptitude de la ressource d'effectuer différents processus efficacement et économiquement. La flexibilité interne, du point de vue des ressources (pour restreindre la notion d'équipements) se décline suivant les quatre niveaux du modèle. Les quatre grandeurs suivantes demandent à être définies :

- Flexibilité des machines dans la transformation de lots,
- Flexibilité des montages d'usinage dans la transformation de pièces,
- Flexibilité des porte-outils dans la transformation de surfaces,
- Flexibilité des arêtes de coupe dans la transformation de matériaux.

Comme souligné dans [Gunasekaran 2002], les technologies, les personnes et les informations doivent être coordonnées pour exister, dans un environnement de compétition et de changements continus et imprévisibles. Les études proposent des définitions pour caractériser le changement (de référence ou de volume par exemple). Le niveau de précision des définitions, permettant de quantifier l'aptitude à s'adapter à ce changement, peut néanmoins être amélioré.

C'est certainement l'explication du faible nombre de travaux concernant les technologies liées à l'Usinage Grande Vitesse, concernant la mesure de leurs flexibilité. Pourtant, il est unanimement reconnu que l'UGV participe à améliorer la flexibilité d'un système de production.

2.3.2.3) Généralisation

L'étude des solutions dédiées à la surveillance des ressources, a permis de mettre en valeur les points suivants :

- La modélisation du procédé d'Usinage Grande Vitesse n'est pas à ce jour, suffisamment complète et fiable pour pouvoir prédire, pour chaque produit, l'ensemble des solutions techniques et organisationnelles à mettre en œuvre.
- La difficulté de choisir les composants du système de production est de ce fait accentuée, puisque leurs performances sont difficiles à prévoir.
- Des choix technologiques prépondérants, semblent se dessiner. Sur la base de l'analyse de l'activité de surveillance, les propositions suivantes semblent être généralisables :
 - Les activités du MSOP, autres que l'Action, peuvent être menées sur site ou hors site. Nous entendons par là qu'elles peuvent être effectuées directement à l'intérieur de la machine-outil (restreignant le temps d'opérabilité des ressources) ou à l'extérieur de la machine. Ces deux modes conduisent néanmoins à des résultats comparables, bien que la solution technologique adoptée soit fondamentalement différente.
 - Le choix entre des solutions standards ou modulaires est possible pour tous les équipements de production (moyens périphériques et ressources). L'exemple de la surveillance a montré que des composants technologiques des ressources pouvaient être intégrés à la conception de la machine, ou être ajoutés par l'utilisateur suivant ses applications. L'addition ultérieure de nouveaux composants n'est possible qu'à la condition où la structure de la machine a été spécifiée dans ce sens.

Ce type de constatations montre la nécessaire prise en compte simultanée :

- Des contraintes liées à l'obtention d'une qualité de produit donnée. Ceci est valable quel que soit le niveau du modèle [produit-ressource] ;
- Des contraintes liées à l'obtention des produits variés et changeants (de façon prévisible ou non). Ceci est, a priori, également valable quel que soit le niveau du modèle [produit-ressource].

A ce stade de notre étude, une partie des conséquences ne peut pas encore être formalisée. [Moraru 2004], dans son étude de la maintenance des électrobroches, dit que ce « produit (ndlr l'électrobroche) aussi complexe peut parfois poser des problèmes importants du point de vue de la fiabilité et de la maîtrise globale du cycle de vie. Les machines travaillent dans des conditions difficiles, très différentes de celles d'un atelier d'essais ».

L'étude des impacts de l'introduction de l'UGV ne peut donc se limiter à un classement hiérarchique des propriétés des produits et des technologies existantes à un instant donné. Leurs conséquences sur la vie future du système de production, où elles peuvent être implantées, c'est-à-dire tout au long de leur cycle de vie, sont également à prendre en compte et à formaliser.

L'analyse technique devient alors inséparable de l'aspect méthodologique du choix des ressources. Aussi, l'analyse du cycle de vie du système de production utilisant le procédé d'Usinage Grande Vitesse sera abordé de façon plus détaillée dans le chapitre Deux.

2.4) Conséquences managériales

Le succès des projets de conception de systèmes de production passe par l'intégration des trois niveaux de décisions : opérationnel, organisationnel et stratégique. La chaîne décisionnelle doit être appréhendée dans son intégralité, et coordonnée avec les fonctions du système [Doumeingts 2000].

C'est pourquoi, après avoir exposé des éléments relatifs aux impacts techniques de l'Usinage Grande Vitesse, ses impacts sur le management du système de production sont maintenant analysés. Cela englobe les impacts sur la stratégie de l'entreprise et sur la gestion des ressources humaines. Ces derniers sont issus d'un état de l'art des travaux relatifs à l'intégration de nouvelles technologies, dans un cas général.

2.4.1) Impacts stratégiques de la technologie

Les approches managériales regroupent dans ce terme « technologie », celle relative au produit et celle relative à la fabrication du produit, généralement sans distinction. Une stratégie technologique se définit comme étant une « stratégie s'appuyant sur la valorisation de technologies dont l'entreprise a acquis une maîtrise exceptionnelle » [HEC 1997]. Les impacts, sur les grandeurs utilisées pour justifier des choix « stratégiques » (limités à la prise en compte de la technologie de fabrication) d'une entreprise, sont ici développés.

2.4.1.1) Stratégie concurrentielle

D'après la formalisation proposée dans [HEC 1997], la stratégie d'entreprise se définit de la façon suivante : « Élaborer la stratégie de l'entreprise, c'est choisir les domaines d'activité dans lesquels l'entreprise entend être présente et allouer des ressources de façon à ce qu'elle s'y maintienne et s'y développe ».

Deux niveaux de stratégie découlent de cette définition :

- La stratégie de groupe : son objectif est de déterminer les domaines d'activités de l'entreprise. Dans le secteur de l'industrie mécanique, cette stratégie vise à choisir quels produits sont fabriqués au sein de quelle entité du groupe industriel.
- La stratégie concurrentielle : elle vise à définir les manœuvres que l'entreprise doit accomplir afin de se positionner favorablement face à ses concurrents dans un secteur donné. Pour chaque entité du groupe industriel, les produits et les ressources allouées sont choisies ou évaluées suite à des analyses interne et externe, et suivant la volonté du système décisionnel.

Cette distinction nous amène à préciser les bornes de notre étude. Nous nous focalisons sur les impacts de l'Usinage Grande Vitesse sur le système de production. Dans le cadre de cette thèse, nous ne remettons pas en cause la conception du produit. Aussi, notre approche de l'introduction de l'Usinage Grande Vitesse s'inscrit

plutôt dans une stratégie concurrentielle (sans modifier la stratégie de groupe), orientée sur l'allocation des ressources.

Dans ce contexte, la structure de concurrence demande à être explicitée. Elle peut être modélisée par cinq classes d'influence : les clients, les fournisseurs, les nouveaux arrivants (produits, consommateurs, fournisseurs), la société et les concurrents directs du secteur industriel. La figure (38) illustre ces classes et leurs interactions réciproques.

Leur influence sur les décisions prises au sein de l'entité industrielle se traduit par des pressions, de la part des clients et fournisseurs, ou des menaces, de la part des concurrents du secteur (le terme de « marché » n'est pas utilisé vu l'ambiguïté des définitions existantes). A l'inverse, cet ensemble lui permet également de jouir de certaines opportunités d'évolution de ses activités.

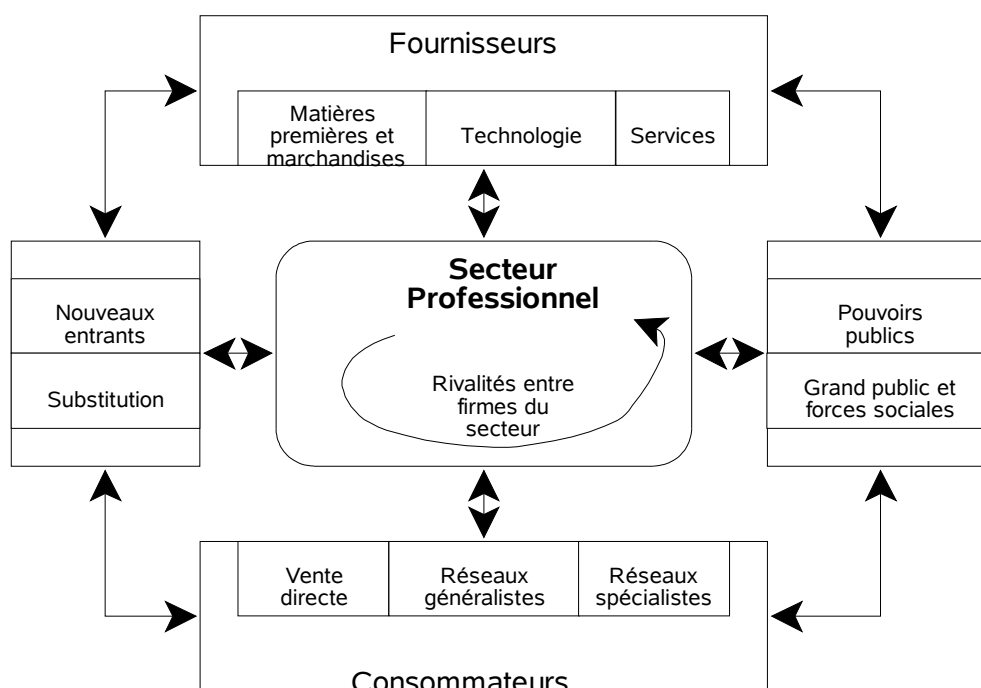


Figure 38 : La dynamique concurrentielle [HEC 1997]

2.4.1.2) Critères influencés par la technologie

La figure (38) met également en évidence l'imbrication de toutes les composantes jouant un rôle dans la construction et le déploiement d'une stratégie concurrentielle. Prévoir, ou décrire, l'influence de la technologie (du produit ou des ressources) revient à essayer de dégager de ce modèle générique le poids d'une seule des variables identifiées. Cela en montre la difficulté, voire l'impossibilité.

[Johnson 2000] propose néanmoins un cadre de formalisation des critères pertinents, préalables à la décision stratégique. Se positionner par rapport à la concurrence intrasectorielle, demande notamment d'analyser les rivaux du secteur (en externe) sur la base des critères suivants :

- Le degré de spécialisation,
- l'image de marque,
- la politique de prix,
- le mode de distribution,

- l'étendue des services annexes proposés,
- la qualité perçue du produit,
- le type de politique commerciale,
- le degré d'intégration verticale,
- la maîtrise technologique,
- la position en termes de coûts,
- les relations avec la société mère,
- les relations avec les pouvoirs publics.

Comme ce sont des critères de comparaison objectifs d'un secteur concurrentiel, la connaissance de leurs niveaux de référence et réel en interne est nécessaire, et offre un cadre de classement des impacts de l'Usinage Grande Vitesse.

La proposition du tableau (5) est construite sur la base du modèle GRAI, structurant les fonctions du système décisionnel et le type de décision pris par les centres de décision. Les critères précédemment recensés sont ainsi classés suivant leur dépendance vis-à-vis des niveaux de décision pris.

Par exemple, les décisions prises au niveau opérationnel influent directement sur la qualité perçue du produit. Le choix de paramètres de coupe influence l'état de surface, donc l'aspect esthétique de la pièce et sa perception par le consommateur.

Gérer les produits	Planifier	Gérer les ressources	Critère
Décisions stratégiques Horizon de 5 ans / Période de 1 an			Degré de spécialisation, image de marque, politique de prix, relations avec la société mère, relation avec les pouvoirs publics le mode de distribution, type de politique commerciale,
Décisions organisationnelles Horizon de 1 ans / Période de 1 mois			Degré d'intégration verticale,
Décisions opérationnelles Horizon de 2 mois / Période de 1 semaine			Qualité perçue du produit, maîtrise technologique, position en termes de coûts

Tableau 5 : Classement des critères influencés par l'UGV

Le paragraphe 2.2 a permis de montrer qu'un intérêt fondamental de l'UGV est de pouvoir améliorer la précision des produits sans en dégrader les délais de fabrication. Une telle modification du process de fabrication, dans un cas général, se répercute sur l'analyse (qualitative ou quantitative) de ces critères, puisque la qualité perçue des produits ou leur prix en sont affectés dès leur transformation.

De l'analyse du tableau 5, nous constatons à l'évidence, que tous les critères identifiés ne relèvent pas uniquement de décisions stratégiques. Ils ne semblent pas indépendants (la qualité perçue du produit influe sur l'image de marque, la maîtrise technologique sur la position en termes de coût) et contrôlables en interne (l'image de marque par exemple), par un seul type de centre de décision.

La formalisation des impacts stratégiques est donc, dans l'état actuel de nos modèles, trop restrictive. Pourtant, leur poids dans la décision finale d'implantation ne peut être négligé, vus les centres de décision concernés dans un tel projet.

2.4.2) Conséquences sur les ressources humaines

« La valorisation et le développement des ressources humaines constituent des variables stratégiques de développement et non pas seulement des variables d'ajustement » [Le Boterf 2003]. Ce paragraphe présente dans quelles mesures l'évolution de la technologie d'usinage affecte la gestion des ressources humaines. Il s'appuie sur l'analyse des liens existant entre les compétences des personnels et leur formation.

2.4.2.1) Formation

La communauté des chercheurs des AMT et NMT (Advanced et New Manufacturing Technologies) propose des études portant sur l'introduction de nouvelles technologies. Les implémentations de systèmes de CFAO, de l'Usinage à Commande Numérique, mais aussi de techniques de management comme le QFD (Quality Function Deployment) sont analysées. Cet état de l'art se concentre sur les conséquences sur les personnes impliquées dans le projet d'évolution.

L'importance de la prise en compte des aspects humains est mise en relief par [Sun 2000] ou [Gunasekaran 2002]. Il y est souligné que l'implémentation d'AMT doit se faire en équilibrant les aspects techniques et le développement des ressources humaines.

La formation du personnel est la concrétisation de ces conséquences. Comme le souligne [Sohal 1999], « la formation est vitale avant l'introduction de la nouvelle technologie dans l'entreprise, aussi bien que pendant son implémentation et son fonctionnement ».

Les apports de [Molleman 2002] notamment, permettent de justifier la nécessité de la formation. « Avec l'acquisition de nouveaux moyens de production, le travail (donc les employés) s'oriente plus encore sur le process, et les études antérieures ont montré que de tels investissements conduisent souvent une réduction du nombre de postes, mais aussi à des emplois plus riches ». Cette constatation est renforcée par le fait que les opérateurs sont ainsi amenés à conduire le fonctionnement de machines de haute technicité.

Enfin, les activités de formation du personnel influencent le fonctionnement d'un système de production existant. Les interventions ponctuelles d'experts extérieurs (caractéristiques d'activités de formation) se matérialisent notamment par des journées où le personnel de l'entreprise ne peut être alloué à des activités de production, et par le coût de sa mise en œuvre.

2.4.2.2) Ressources et Compétences

La non-maîtrise complète, dans certaines situations, du procédé d'Usinage Grande Vitesse est une des conclusions de l'analyse des impacts techniques effectuée précédemment. Ce paragraphe présente un point de vue d'explication des impacts de la maîtrise technique du procédé, sur les ressources humaines à impliquer dans les activités.

La non-maîtrise se répercute notamment par des variations entre l'activité réelle sur le poste de production et l'activité prescrite. Cette constatation de [Le Boterf 2003] (non spécifique à l'UGV) oblige « les opérateurs à s'approprier les directives et à les interpréter ».

Le respect des critères de qualité des produits est ainsi à relier aux compétences des opérateurs. « Le professionnel est celui qui sait gérer un ensemble de situations professionnelles, dont la plupart se caractérisent par leur complexité » [Le Boterf 2003]. Les notions de compétences et de savoirs ne doivent pas être confondues. Un opérateur compétent est une personne disposant de savoirs utilisés à bon escient dans des situations complexes.

Il fait également la proposition de déclinaison de ce savoir gérer, en

- Savoir agir avec pertinence ;
- Savoir mobiliser des « ressources » (savoirs, savoir-faire, aptitudes ou qualités, expériences cumulées) dans un contexte professionnel ;
- Savoir combiner des « ressources » multiples et hétérogènes ;
- Savoir transposer ;
- Savoir apprendre et apprendre à apprendre ;
- Savoir s'engager.

Sur cette base, la compétence se définit par « la faculté d'utiliser cet équipement (en ressources personnelles et de son environnement) de façon pertinente ».

Le changement induit par l'introduction de nouveaux équipements de production (environnement du professionnel) modifie les ressources personnelles et leur « mise en œuvre ». La formation et l'implication des différentes catégories de personnel tout au long du projet, contribue en majorité à l'acceptation et au succès de ce changement. Cette conclusion a été unanimement rencontrée parmi les résultats des travaux du domaine des Advanced Manufacturing Technologies.

Ainsi, la prise en compte du « facteur humain » ne peut être éludée d'un projet d'introduction d'équipements d'Usinage Grande Vitesse.

3) Conclusion

Au travers de notre modélisation des systèmes opérationnels de Production, l'articulation des trois transformations fondamentales est mise en valeur. La conception d'environnements temporels et spatiaux a pour but de réaliser des transformations morphologiques optimales, mais aussi spatiales et temporelles. Les possibilités de l'Usinage Grande Vitesse, concernant les propriétés des produits, sont hiérarchisées et quantifiées. Les technologies utilisées pour mettre en œuvre les ressources, afin de satisfaire les spécifications de qualité des produits, peuvent être classées, comme étant des composants participant à la réalisation des activités de lancement, de préparation, de transfert, de contrôle et de surveillance.

Néanmoins, la dimension temporelle est absente du MSOP. Les vues « Structure » et « Activités » d'un système de production sont représentées, à contrario de la vue « Évolution ». La formalisation des interactions entre les ressources et les contraintes liées à leur évolution au cours de leur cycle de vie ne peut, à ce stade de l'étude, encore être effectuée. Son étroite dépendance avec les aspects économiques justifie son intégration dans le contexte méthodologique du chapitre Deux.

D'autre part, la formalisation des processus et environnements a déjà mis en évidence les couplages formalisés par les environnements temporels et spatiaux et la mise en œuvre des ressources. C'est pourquoi, la méthode d'introduction de l'Usinage Grande Vitesse se doit d'être globale. Modifier un des constituants du système peut entraîner des répercussions sur tous les autres.

Comme montré dans [Goldratt 1984], l'union des optimisations locales d'un système de production conduit rarement à l'optimisation globale. La Théorie des contraintes qui en suit énonce un principe ne pouvant être dérogé : les programmes de fabrication doivent prendre en compte toutes les contraintes simultanément.

L'utilisation de la décomposition en sous-systèmes, propre à la systémique, doit rester dans cette logique d'optimisation globale. Chaque étude d'un sous-processus doit prendre en compte les caractéristiques des ressources, des produits bruts, intermédiaires et finis ainsi que ses environnements temporels et spatiaux. Par exemple, des situations particulières ne sont pas à exclure où la conception d'un montage d'usinage peut influencer le choix de la nuance d'outils de coupe : le bridage d'une pièce flexible peut imposer une limitation des sollicitations mécaniques, qui suivant, le matériau usiné, se traduit par des paramètres de coupe minorant les efforts de coupe. De même, le type de lubrification peut imposer ses contraintes lors du dimensionnement de la taille des lots de fabrication, ou être exploitée sur la stratégie technologique de l'entreprise.

Enfin, des éléments de réponse ont été donnés, suivant un classement hiérarchique, quant aux performances de l'Usinage Grande Vitesse sur les produits de l'industrie mécanique : les copeaux, les surfaces, les pièces et les lots. Des nouvelles contraintes sur le choix des ressources sont apparues.

Pourtant, les différences entre Usinage Grande Vitesse et Usinage « Conventionnel » montrent également la complexité de la distinction des technologies dépendantes des deux modes de formation du copeau. Il est difficile de distinguer parmi les évolutions technologiques, celles qui sont :

- Des réponses directes et obligatoires à des contraintes imposées par l'UGV ;
- Des intégrations de technologies, inhérentes à l'évolution du secteur industriel.

Par exemple, il est impossible d'affirmer que, si le mode de formation du copeau propre à l'UGV était encore inconnu, les technologies des moteurs linéaires ou des électrobroches ne seraient pas utilisées sur des machines « conventionnelles ». Cette ambiguïté renforce la nécessité d'élargissement de notre problématique initiale, en replaçant l'introduction de l'UGV dans le contexte plus générale de l'évolution des méthodes d'usinage.

La suite de cette étude contribue à guider les concepteurs de système de production, dans leurs choix de solutions technologiques et la gestion de la complexité de leur mise en œuvre.

Chapitre 2 : Conception des systèmes de production

Implanter une nouvelle technologie dans un atelier d'usinage, ne peut se limiter à identifier les impacts de celle-ci sur l'installation existante. Les impacts techniques et organisationnels, identifiés dans le chapitre précédent, montrent la nécessité d'une approche globale du processus aboutissant à l'introduction de l'Usinage Grande Vitesse. Aucun des aspects de la conception d'un nouveau système de production ne peut a priori être omis. L'objet de ce chapitre est centré sur la méthode de conception des systèmes de production, afin de constater les manques parmi les méthodes actuelles, mais aussi d'en tirer les meilleurs concepts et pratiques.

Le premier paragraphe est consacré à l'identification des besoins méthodologiques. Ils sont principalement extraits des domaines attrayant à l'étude du cycle de vie des moyens de production et des pratiques issues des méthodes de conception intégrée.

Le second concerne l'analyse bibliographique des méthodes existantes. Les besoins identifiés servent de filtres au choix des travaux présentés dans la littérature et de grille de lecture parmi ceux recensés. L'analyse met en évidence les compléments à construire, en terme de :

- Formalisation des activités de l'avant-projet,
- Construction d'espaces de communication,
- Robustesse des hypothèses, démarches et résultats traditionnellement proposés.

La synthèse de ces aspects bibliographiques aboutit, dans le troisième paragraphe, à la formulation de la problématique complète de cette étude. Par la modélisation du système cible, suivant deux approches économique et objet, les complexités du système et du processus de conception sont démontrées. La proposition d'une nouvelle méthode de conception en phase d'avant-projet en est déduite.

1) Besoins méthodologiques

Le chapitre précédent a permis de localiser les impacts de l'introduction de la nouvelle technologie, par rapport à un modèle des systèmes opérationnels de production, créé spécifiquement. Dans le cadre méthodologique de ce chapitre, ce modèle peut également être replacé dans une échelle temporelle.

1.1) Objectifs stratégiques et opérationnels

1.1.1) État de l'art

Le but d'une entreprise « est de faire de l'argent en augmentant le bénéfice net, en améliorant simultanément le rendement des investissements et en accroissant dans le même temps la trésorerie » [Goldratt 1984].

Ce but se traduit, pour la conduite d'un atelier de fabrication, par la maîtrise de la combinaison des dépenses liées aux ressources et des résultats des ventes des produits (sans entrer dans une analyse comptable plus détaillée). La maîtrise économique se décline, en interprétant les modèles de GRAI, suivant toutes les relations entre les différents centres de décision constituant le système décisionnel. Pour assurer la pérennité du système, la synchronisation entre la gestion des ressources et des produits doit être assurée.

Le cycle de vie d'un produit, représenté sur la figure (39), modélise les évolutions probables du chiffre d'affaires et des profits d'un produit donné. La part dans le bénéficiaire, dédiée aux ventes, est le cumul, pour tous les produits fabriqués dans l'atelier, des courbes en cloche d'autant de cycles de vie. La part due aux ressources, dans la différence entre le produit des ventes et les profits, est l'inconnue qui doit être déterminée et optimisée.

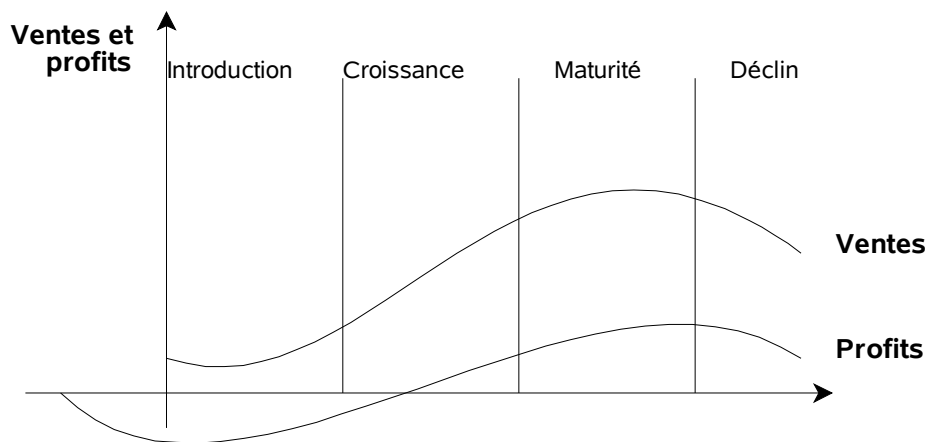


Figure 39 : Cycle de vie d'un produit [HEC 1997]

Cette courbe de profits est le résultat espéré des stratégies technologiques. Ces dernières s'intègrent dans la stratégie générale de l'entreprise. Vernet dans [Vernet 1997] démontre qu'il existe au moins, deux aspects différents de liaison entre la Stratégie Générale et la Stratégie Technologique, dans une entreprise :

- Établir une nouvelle Stratégie Générale fondée sur certaines compétences technologiques;
- Améliorer les compétences technologiques afin de réaliser la Stratégie Générale actuelle.

Une Stratégie Technologique peut donc être, à la fois, la cause et la conséquence d'une Stratégie Générale. La figure (40) illustre la symétrie du modèle ainsi construit.

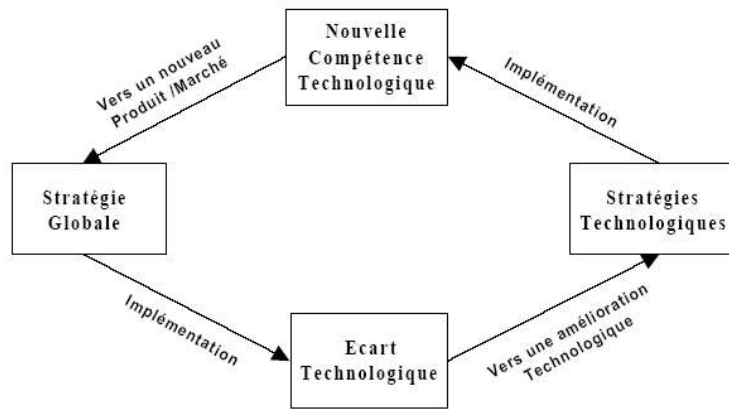


Figure 40 : Stratégie technologique et stratégie générale [Vernet 1997]

Pour choisir et mettre en cohérence les stratégies technologiques avec la stratégie générale, les outils existants, dont des exemples sont donnés par [Vernet 1997] ou [Pretorius 2000], sont centrés sur trois notions fondamentales [HEC 1997]. Pour chacune d'elles, l'approche de Vernet est analysée, quant à son adéquation à la méthode recherchée.

- Analyse du Patrimoine technologique

Le centre de décision doit chercher à apprécier ses propres forces (les atouts de l'entreprise), notamment en fonction de sa connaissance du terrain. Vernet propose de détecter les processus-clé et d'en déduire les activités critiques et ses dépendances avec d'autres activités. Or, il a été démontré que les activités « Action » étaient toutes des composantes des quatre sous-processus (Cf. MSOP) du processus de Production d'un atelier. En règle générale, toutes les activités d'un niveau donné sont toutes aussi « critiques » les unes que les autres, mais le produit résulte de « l'Action ». Notre étude se restreint à l'évolution des ressources impliquées dans l'activité « Action », et met ensuite en évidence leurs impacts sur les autres moyens.

- Typologie concurrentielle des technologies et le porte-feuille de technologies

La typologie des technologies s'applique, dans notre étude, par la restriction autour des procédés d'usinage. Nous nous plaçons uniquement dans les contextes d'entreprises désirant évoluer vers de l'Usinage Grande Vitesse. Le procédé d'usinage par enlèvement de matière est supposé être le seul existant satisfaisant les exigences sur la définition des produits. En d'autres termes, l'UGV est la seule solution technique générale envisagée dans l'évolution du système de production. Vernet propose d'établir les matrices Attraits de la technologie et Atouts de l'entreprise. L'attrait d'une technologie est mesuré par son impact sur la performance de l'activité à laquelle elle appartient. Or l'UGV est un procédé dont les impacts sont encore partiellement formalisés (cf. chapitre 1) et ne peut figurer au portefeuille des technologies déjà disponibles en interne !

Le risque de manque de connaissances à son sujet rend cette approche (dans cette situation) que partiellement applicable pour une nouvelle technologie comme l'UGV.

- Cycle de vie des technologies

Ce modèle a pour but d'anticiper l'allocation des ressources au cours de toute leur vie dans l'entreprise. Le premier chapitre a permis de démontrer que les impacts de l'UGV sur les ressources, le long de leur cycle de vie, ne sont que partiellement formalisés. Cet élément est approfondi au cours du paragraphe 1.2 de ce chapitre.

Ainsi, ces modèles « stratégiques » ne peuvent se suffire, dans le cas d'une évolution vers l'UGV. En effet, toute stratégie technologique, comme toute autre stratégie, participe nécessairement à l'amélioration des profits. Les choix stratégiques doivent donc intégrer des aspects opérationnels pour que leur implémentation soit efficace.

1.1.2) Formulation des objectifs

La mise en cohérence entre les visions du process aux niveaux stratégique et opérationnel permet de formuler les objectifs de l'implantation de l'UGV suivant deux modes :

- **Mode 1 : Exploiter les impacts de l'Usinage Grande Vitesse pour améliorer des critères stratégiques, sans dégrader les résultats économiques des ventes des produits.**

Par exemple, une entreprise peut chercher à améliorer son image de marque en vendant des pièces avec une esthétique soignée, un meilleur état de surface. L'UGV peut y contribuer. Par contre, si une augmentation du coût de fabrication est nécessaire, le résultat net des ventes doit la compenser.

La formalisation sous forme d'une grille GRAI (cf. figure (41)) de ce mode permet de comprendre les mécanismes entrant en jeu. Les fonctions « Autres » représentent des entités externes ou internes au système de production, comme le service commercial, le marketing... Pour rappel, les doubles flèches modélisent les liens décisionnels et les flèches simples les liens d'information. La particularité de ce premier mode est la nécessité de répercuter les décisions prises sur le procédé de fabrication vers la gestion des produits, afin d'assurer la cohérence complète à la fois sur les fonctions et les niveaux de décision.

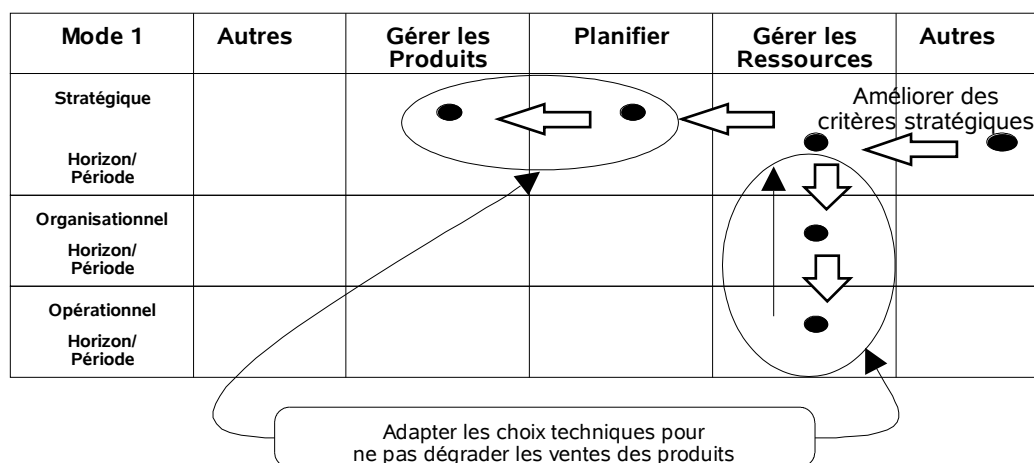


Figure 41 : Grille GRAI du mode 1

- **Mode 2 : Améliorer les résultats des ventes des produits par l'implémentation de l'UGV et en valoriser ensuite la maîtrise technologique dans le secteur industriel.**

Par exemple, une entreprise peut chercher à conserver la qualité (précision et délai) de ses pièces en utilisant de l'UGV, en supprimant des phases de rectification contraignantes en terme de traitement des boues de rectification. Cette solution technologique peut être à terme exploitée en communiquant auprès de ses clients sur la maîtrise des conséquences écologiques.

La modélisation au travers de la grille GRAI de ce mode (figure (42)) montre cette fois que le système opérationnel résulte d'une chaîne décisionnelle initiée par la gestion des produits. Les liens d'information sortant du système de production permettent la valorisation des nouvelles performances de l'UGV, dans le cadre d'une stratégie technologique.

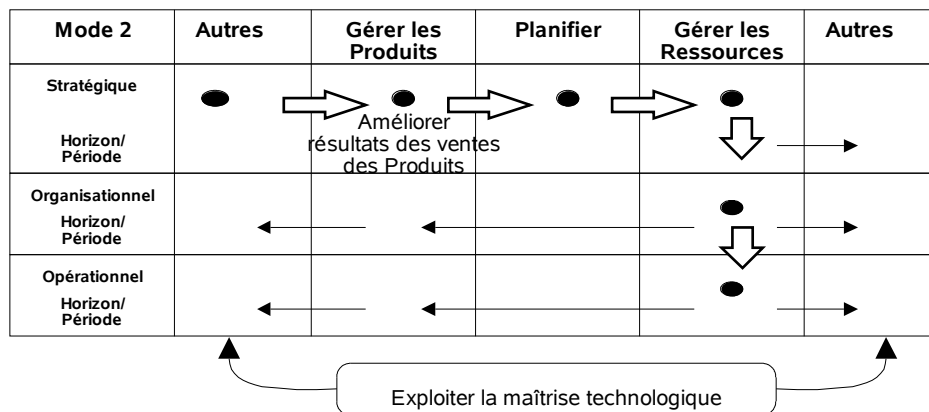


Figure 42 : Grille GRAI du mode 2

La méthode de conception doit ainsi pouvoir répondre à ces deux classes d'objectifs. La mise en cohérence des aspects stratégiques et opérationnels en est la principale propriété.

1.2) Cycle de vie des ressources

Pour évaluer la pertinence d'un nouveau système de production, toutes les phases de son cycle de vie doivent être étudiées. En effet, pour atteindre le but d'une entreprise, l'évolution de ses actifs ne peut se limiter à une vision à court terme des profits, comme montré dans [Goldratt 1984]. Ce paragraphe a pour objectif de présenter en détails les différentes phases auxquelles l'introduction de l'UGV fait référence. Cela permet de mettre en évidence :

- Quelles sont les phases de la vie du système touchées par l'éventuelle évolution de la technologie d'enlèvement de matière ;
- A quelle(s) phase(s) du cycle de vie, la problématique de cette étude va contribuer à en améliorer les profits.

1.2.1) Phases du cycle de vie des ressources

La notion de cycle de vie d'un produit en général, ou d'un système de production, est maintenant répandue à la fois en recherche et développement et en bureau d'Études. Elle figure parmi les concepts fondamentaux des architectures de référence proposées dans le domaine de la modélisation d'entreprise.

L'objectif des modèles proposés dans ce domaine est de fournir une compréhension partagée par tous les utilisateurs, du fonctionnement de l'entreprise et de sa structure, pour guider l'analyse et la prise de décision (habituellement sur la base de simulations ou de scénarios "what-if"), ou pour contrôler son fonctionnement [Berio 1999].

De nombreuses méthodes et techniques de modélisation ont été proposées dans le domaine, au cours des dix dernières années. CIMOSA, GIM, ARIS, l'ENV 40 003, PERA et GERAM figurent parmi les principales propositions d'architecture de référence [Vernadat 1999]. Elles fournissent un cadre général et des points de repère aux utilisateurs, en leur indiquant quels aspects de l'entreprise doivent être pris en compte. Leur examen du point de vue cycle de vie est l'objet de ce paragraphe (le point de vue méthodologie de conception est traité au paragraphe 2).

Le point de vue cycle de vie est principalement développé dans le cadre de CIMOSA, PERA et GERAM. La norme internationale [ISO/IEC 15288 2002] en est déduite. Le tableau (6) illustre les phases du cycle de vie d'un produit telles qu'elles sont présentées dans la norme.

Étapes du Cycle de Vie	Objectifs	Type de décisions à prendre
Conceptualisation	Identifier les besoins des demandeurs Explorer les concepts de solution Proposer des solutions viables	Exécuter l'étape suivante
Développement	Préciser les besoins Déterminer les composants du système Concevoir le système	Continuer l'étape en cours
Implémentation	Vérifier et valider le système Produire le système en série Contrôler et tester les produits	Retourner à l'étape précédente
Utilisation	Faire fonctionner le système pour satisfaire les exigences des utilisateurs	Maintenir l'activité liée au projet
Maintenance	Assurer le maintien des performances du système	Clore le projet
Démantèlement	Jeter, recycler, ou archiver le système	

Tableau 6 : Phases du cycle de vie [ISO/IEC 15288 2002]

Dans cette norme, consacrée à la gestion du cycle de vie de tout type d'objet, ce dernier existe sous une forme matérielle depuis sa phase d'implémentation, jusqu'à son démantèlement. Par rapport à un système quelconque, auquel le tableau (6) est applicable, les systèmes de production présentent quelques particularités, qui ont été détaillées dans le premier chapitre. Par exemple, la maintenance ne peut être considérée comme une phase à part entière et séquentielle du système. Comme présenté dans le paragraphe 1.2.3., le système se détériore dès le début de cette

phase d'implémentation, et peut nécessiter des interventions de maintenance à tout moment de son cycle de vie. Il est donc nécessaire de se recentrer sur le cycle de vie « particulier » des systèmes de production, pour en étudier l'évolution. L'architecture de référence proposée par GERAM leur est d'avantage consacrée.

GERAM (Generalised Enterprise-Reference Architecture and Methodologies), présentée dans [ISO TC 184 2002], est définie par ses auteurs, comme une approche pragmatique fournissant une architecture de référence généralisée pour décrire tous les composants exigés lors des processus, tels :

- Projets d'Ingénierie ou d'intégration en entreprise ;
- Changements incrémentaux pour l'amélioration continue.

GERAM est donc une architecture généralisée, intégrant les résultats de travaux pluridisciplinaires. Elle généralise les architectures de référence introduite par CIMOSA, GRAI-GIM et PERA, pour les plus significatives. L'architecture de référence proposée est représentée sur la figure (43). GERAM propose des normes permettant d'optimiser le choix d'outils et de méthodes participant à une intégration plus complète de la conception et au succès de processus de changement qui peuvent intervenir durant la phase opérationnelle de l'entreprise.

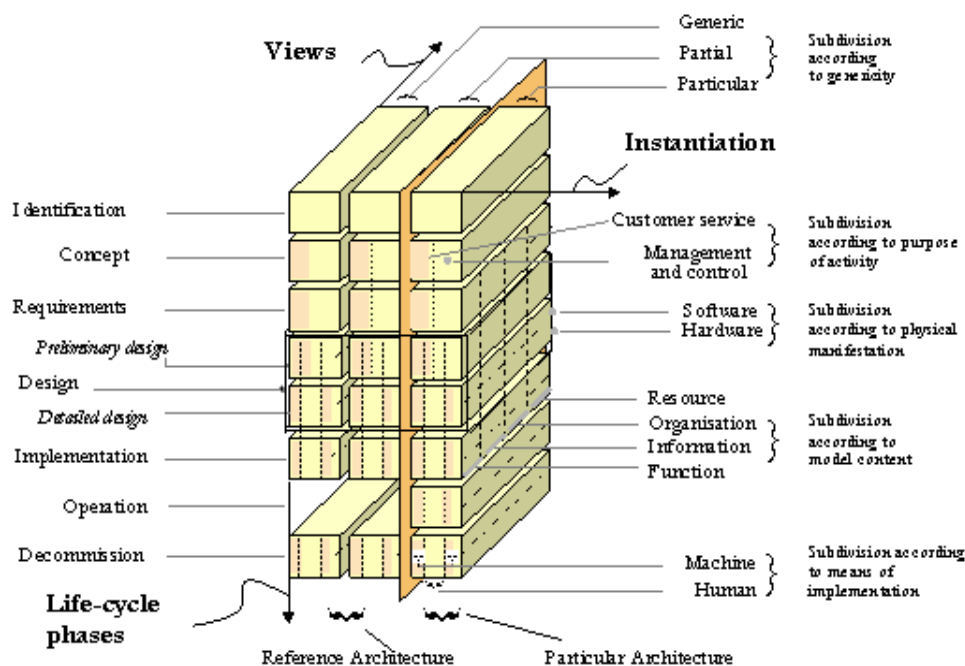


Figure 43 : Architecture de référence de GERAM [ISO TC 184 2002]

Le cycle de vie, tel que décomposé par GERAM, est dérivé de celui de PERA, [Williams 1992], [Li 2002], [Vernadat 1999], et concerne l'entreprise ou toute entité qui en est issue. Les phases du cycle de vie apparaissent sur l'axe vertical « Life-Cycle Phases ». Elles sont basées sur les activités pertinentes à mener au cours de la vie de l'entité. Les phases génériques sont :

- **L'identification**

Ensemble d'activités ayant pour résultat la définition de l'entité (par ses frontières et ses échanges avec l'environnement) dont le cycle de vie doit être considéré.

- **La génération de concepts**

Ensemble d'activités générant les concepts fondamentaux de l'entité, tels : la définition des missions de l'entité, les visions, valeurs, stratégies et objectifs, les concepts opérationnel, etc...

- **La définition des besoins**

Ensemble d'activités aboutissant à la description des exigences opérationnelles de l'entité, ses processus caractéristiques, et des besoins fonctionnels, comportementaux, informationnels et en termes de capacité. Cela inclut les exigences liées à la fabrication de l'entité, à son fonctionnement, sa gestion et son contrôle. Il n'importe pas, à ce niveau du cycle, de définir si ces processus s'appuient sur des ressources humaines ou matérielles.

- **La conception, scindée en conceptions fonctionnelle et détaillée**

Ensemble d'activités construisant les spécifications de l'entité, en considérant tous ses composants qui permettent de satisfaire les exigences définies par la phase précédente. Pour cela, cette phase comporte deux étapes : la conception fonctionnelle et la conception détaillée. Leur étude détaillée fait l'objet des prochains paragraphes.

- **L'implémentation**

Ensemble d'activités définissant toutes les tâches à exécuter pour construire l'entité. L'implémentation, au sens large, comprend :

- La consultation de fournisseurs, la passation de commandes, l'achat, la configuration des moyens matériels ou logiciels ;
- L'embauche et la formation de personnels, l'adaptation de l'organisation des ressources humaines ;
- Les tests et la validation des composants, l'intégration du nouveau système, la validation de la nouvelle installation et la mise en production.

- **Le fonctionnement**

Ensemble d'activités résultant dans la fabrication des produits ou services destinés aux clients. Le détail de ces activités et leur structure est donné dans le Modèle des Systèmes Opérationnels de Production, présenté dans le premier chapitre. La transformation des produits par les ressources nécessite la maintenance de ces dernières au cours de cette phase. La détérioration des performances du système fait qu'un système est amené à évoluer, si des activités de maintenance ne suffisent pas, comme démontré dans le premier chapitre (cf. §1.2.3.2).

- **Le Démantèlement**

Ensemble d'activités nécessaires pour, par exemple : modifier les missions de l'entité, assurer de nouvelles formations, reconcevoir tout ou

partie de l'entité, recycler l'entité, la désassembler ou la détruire, à la fin de la phase utile du cycle de vie.

L'introduction de l'UGV modifie les ressources humaines et matérielles à mettre en œuvre durant les phases d'implémentation, de fonctionnement et de démantèlement. Les impacts de ces changements ont été détaillés au cours du premier chapitre.

Pour mener une telle évolution du système de production avec succès, ce sont les phases d'identification, de conceptualisation, de définition des besoins et de conception qui doivent être guidées de façon méthodique. Les contributions attendues de ce travail de recherche doivent ainsi participer à l'amélioration des performances des phases amont du cycle de vie du système de production. Le prochain paragraphe précise le contexte de ces phases amont, de manière à positionner les étapes critiques du cycle de vie à optimiser.

1.2.2) Avant-projet et projet

Les phases amont des projets semblent bénéficier de moins de soutien méthodologique que d'autres phases plus avancées dans le déroulement du projet : « rares sont aujourd'hui les travaux qui permettent de proposer des outils capables de supporter (...), l'évolution extrêmement rapide et dynamique, ainsi qu'une masse d'informations non structurées, produites au cours du travail préliminaire » [Poveda 2001]. Paradoxalement, les décisions qui y sont prises sont essentielles : « peu de travaux ont porté sur les phases d'avant - projet des processus de conception. Pourtant les décisions prises pendant cette phase ont une portée considérable sur le reste du projet. Il est reconnu que les résultats de l'avant-projet de conception satisfont rarement les attentes des clients » [Austin 2002].

Avant d'analyser les aspects méthodologiques, le contexte d'avant-projet est le premier élément à définir. Une première vision s'appuie sur le couple processus-produit (processus de conception, résultat de ce processus). Une seconde vision, plus juridique, s'appuie sur la différenciation des éléments contractualisables entre l'avant-projet et le projet proprement dit. Ce paragraphe a pour objet l'étude de ces deux points de vue et leur confrontation.

La première approche caractérise la transition entre l'avant-projet et le projet proprement dit par le résultat attendu de la phase d'avant-projet, qui sert de donnée initiale au développement d'un projet. Les acteurs de l'avant-projet doivent palier au « caractère informel, sans organisation établie » et au « manque de visibilité sur la distribution de l'activité qui rendent ces phases difficiles à modéliser » [Poveda 2001]. Pour cela, [Girard 2004] propose d'analyser les projets précédents et de prendre les décisions relatives à la définition des besoins, pour valider la faisabilité d'un projet, lors de ses phases amont.

[Grabowski 1999], dans la partie de son étude consacrée à l'avant-projet, énonce que cette première phase a pour objectif de lister de manière détaillée, les spécifications du cahier des charges. Il synthétise des spécifications :

- internes (venant de l'entreprise) ou externes (venant du client) ;
- explicites (fonctions principales) ou implicites (fonctions techniques) ;

- complexes ou élémentaires suivant la possibilité de décomposition ;
- imposées ou désirées, suivant qu'elles répondent à « le système doit avoir » ou « le système devrait avoir » ;
- quantitatives ou qualitatives.

Les projets de conception s'appuient donc sur le résultat d'une définition des besoins ou sur un cahier des charges. L'avant-projet peut se définir comme étant la phase du processus de conception au cours de laquelle la construction du problème et la recherche de principes s'orientent dans toutes les directions [Poveda 2001], et aboutissent à la définition du besoin ou la rédaction d'un cahier des charges. Cependant, l'imprécision et la grande généralité de cette formulation montre, par les interrogations qu'elle soulève, le manque de formalisation du domaine.

Des approches juridiques complètent ce premier point de vue. Elles portent d'abord sur la nature des prestations qui peuvent faire l'objet d'un contrat. On distingue par ce critère l'ingénierie conseil, qui porte essentiellement sur de la prestation intellectuelle, de l'ingénierie d'ensemble ou de construction (general contracting) qui porte sur les études techniques et la réalisation d'un système [Jurist 1999]. Ce critère n'est pas suffisant pour distinguer l'avant-projet du reste du projet. En effet, si les phases préliminaires du projet entrent complètement dans le périmètre de l'ingénierie conseil, celle-ci est aussi présente dans des phases plus avancées, sous la forme, par exemple, de prestation de surveillance ou de direction.

L'analyse du contrat type proposé dans [Jurist 2003], pour les prestations de conseil, retient notre attention sur trois points. Tout d'abord, il y est facultatif mais fortement recommandé de démarrer le contrat par un préambule indiquant les motivations de l'accord. On retrouve ici une forme du besoin initial. Ce préambule sert, le cas échéant, à interpréter le contrat. Il consiste en fait en un modèle du contexte en début de projet, qui bien sûr pourra évoluer. La signature du contrat par l'ensemble des contractants valide le partage de cette représentation.

Ensuite, la clause d'objet du contrat sert à définir « aussi précisément que possible la prestation attendue » en renvoyant à une annexe si cette définition est un peu ample. Ce n'est donc pas la vision juridique du projet qui permet de préciser les activités de l'avant-projet.

Par contre, la clause relative au prix distingue le prix « en régie » à utiliser, si la durée de la prestation ne peut être définie précisément, du prix « forfaitaire » à utiliser pour des tâches bien déterminées dans un calendrier arrêté. Dans le déroulement d'un projet, il existe un état d'avancement intermédiaire à partir duquel il devient possible de rédiger l'objet d'un contrat de manière assez précise. A ce stade, le prestataire s'engage sur une prestation « forfaitaire », c'est-à-dire sur des délais et des performances arrêtés, soumis à l'obligation de résultats. Le transfert de responsabilités sur le prestataire implique une spécification bien avancée du système cible. La séparation entre avant-projet et projet devient nette.

Ce deuxième point de vue du projet montre qu'il est nécessaire de disposer d'une vision suffisamment détaillée du système cible (décrite dans la clause d'objet du contrat) pour pouvoir contractualiser la réalisation d'un système. Le processus de conception doit alors permettre d'atteindre un couple (performances, délais) donné.

La description du système cible doit être comprise par tous les contractants, clients et prestataires, pour que le contrat soit équitable. En effet, l'objet du contrat doit être à la fois adapté aux besoins des clients, et réaliste pour les prestataires. Cette exigence sur la clause d'objet contraint évidemment la nature des données ou du cahier des charges, résultant de l'avant-projet dans la vision processus-produit. Par contre, la nature des actions détaillées à développer en phase d'avant-projet reste peu précise dans ces approches.

Bien que les enjeux de l'avant-projet, qui impliquent la construction d'une représentation consensuelle, soient importants, les phases amont du processus de conception des systèmes de production restent peu formalisées. Le prochain paragraphe est consacré, au travers d'un état de l'art, à l'identification des bonnes pratiques dans un tel processus : l'intégration des disciplines et la nécessité d'une représentation partagée.

1.3) Conception intégrée

Le domaine de la conception intégrée est analysé de manière à identifier les pratiques transposables aux phases d'avant-projet, dont le manque de formalisme vient d'être démontré. Dans un premier temps, le contexte général de la conception intégrée est défini. Puis, le recentrage sur les systèmes de production met en évidence les principes et classes d'outils assurant l'intégration des disciplines. Elle demeure, à de rares exceptions près, exclusivement appliquée lors des phases de projet proprement dites.

1.3.1) Conception et pluridisciplinarité

La nature pluridisciplinaire de l'activité de conception est largement démontrée, comme dans [Fischer 2002], pour qui « le processus industriel de conception est articulé autour d'un ensemble d'acteurs ayant des compétences et des connaissances différentes. La conception est un métier de spécialistes de cultures diverses, qui disposent de types de raisonnements différents et d'une vision du problème dépendante de leur point de vue. ».

Brissaud, dans [Brissaud 2000], montre que délimiter le périmètre de cette pluridisciplinarité pour un projet donné n'est pas évident, car « concevoir est mettre en relation des entités (individus, objets et connaissances) qui ne peuvent être déterminées au préalable ».

Dans [Girard 2004], il est précisé la nature de l'interaction pluridisciplinaire dans le cadre d'une transaction client/prestataire, en indiquant que concevoir c'est « synchroniser la définition d'un produit (la connaissance qu'on en a) avec la connaissance des besoins des clients ». La figure (44) illustre ce processus reliant la connaissance du produit, les besoins des clients et les ressources utilisées pour les synchroniser.

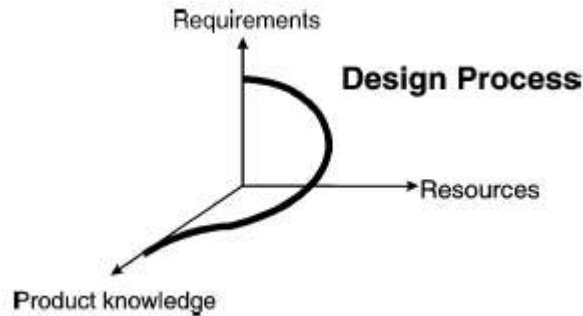


Figure 44 : Synchronisation des besoins et de la connaissance du produit [Girard 2004]

Le succès de ce partage de connaissances, qui peut être fait au travers de la modélisation des produits et des process qui y sont associés, est évidemment lié à la capacité de communication des membres des équipes de conception [Barczak 1991], [Griffin 1992], [Prasad 1996]. Dans [Eversheim 1997], l'auteur ajoute que pour que ce processus soit efficace, il faut, qu'en plus de communiquer, ses acteurs soient capables de « commuter entre les différentes facettes de leurs tâches et de développer des mécanismes de travail concurrents ».

Cet ensemble d'éléments va dans le sens d'une organisation du processus de conception non plus séquentielle mais concurrente, qui mette la communication entre acteurs au cœur du processus de conception. Ces approches ont des dénominations différentes : « ingénierie concurrente » [Sohlenius 1992], « ingénierie simultanée » ou encore « conception intégrée ». Malgré cette diversité de termes, il s'agit toujours de proposer « une approche systématique de l'intégration de la conception du produit et de son process de fabrication, incluant la production et les services associés » [Winner 1988].

« Cette approche se propose de faire que les concepteurs, dès le commencement du projet, considèrent tous les éléments du cycle de vie du produit, depuis sa conception à sa destruction, en incluant la qualité, le coût, les aspects temporels et les besoins des utilisateurs » [Winner 1988]. En d'autres termes, il s'agit « d'efforts coordonnés dans le temps et sur le fond des diverses disciplines, et fonctions participant à l'organisation, qui jalonnent le cycle de vie des produits et services » [Ettlie 1997].

Dans [Prasad 1996], l'auteur précise la conception intégrée est fondée sur huit principes : la définition du niveau de décision de chaque membre, la prise des premières décisions, la structuration du travail, les affinités entre les membres de l'équipe de travail, l'augmentation de la connaissance, la compréhension partagée au plus tôt, l'appropriation et la constance des objectifs. Ces principes mettent l'accent sur une forte interaction entre acteurs, qui passe par une mise en relations de leurs propres connaissances, compétences et langages [Brissaud 2000].

Dans [Paris 2003], ces principes sont interprétés en propriétés attendues d'un processus de conception multi-acteurs. A savoir qu'au cours de ce processus, chaque acteur doit :

- avoir accès à l'ensemble des informations relatives au produit conçu, à tout instant de la conception,
- être capable d'utiliser ses propres applications pour être productif,
- avoir une vue spécifique sur le produit et utiliser son propre langage,

- avoir des facilités de traduction, pour comprendre les autres participants,
- être capable d'introduire ses propres contraintes pour faire émerger le produit.

Un processus de conception intégrée doit donc tenir compte de la dualité entre, d'une part, la communication entre acteurs de disciplines différentes, et d'autre part le travail de conception dans chaque discipline spécifique.

1.3.2) Conception intégrée de systèmes de production

Dans le cadre de la conception des systèmes de production, nous étudions la dualité entre l'efficacité de l'équipe de projet et celle de chacun de ses membres. Elle est abordée par l'analyse des disciplines concernées et des outils de conception assurant la communication interdisciplinaire.

1.3.2.1) Disciplines concernées

Dans [Sayettat 2000], l'auteur propose un recensement des relations génériques possibles en ingénierie simultanée. Son analyse montre que les interactions entre acteurs ont lieu, au cours d'un projet, entre :

- le Bureau d'Études (BE) et la Recherche et le Développement (R&D),
- le BE et le Bureau des Méthodes (BM),
- le BE et le Service Commercial,
- le BM et le service de contrôle,
- le BE et la Production.

Ces départements d'une entreprise peuvent être regroupés suivant leurs missions. Elles sont toutes liées directement ou non à la conception du système de production, en excluant à cet état d'avancement les départements commerciaux. Trois classes semblent ainsi émerger :

- les concepteurs du système de production, responsables de la définition technique du système de transformation du produit,
- les concepteurs de produit, responsables de la définition technique du produit,
- les acteurs de recherche et développement, responsables de la détection et de la validation de nouvelles technologies.

Le diagramme de contexte de la figure (45) peut ainsi être construit.

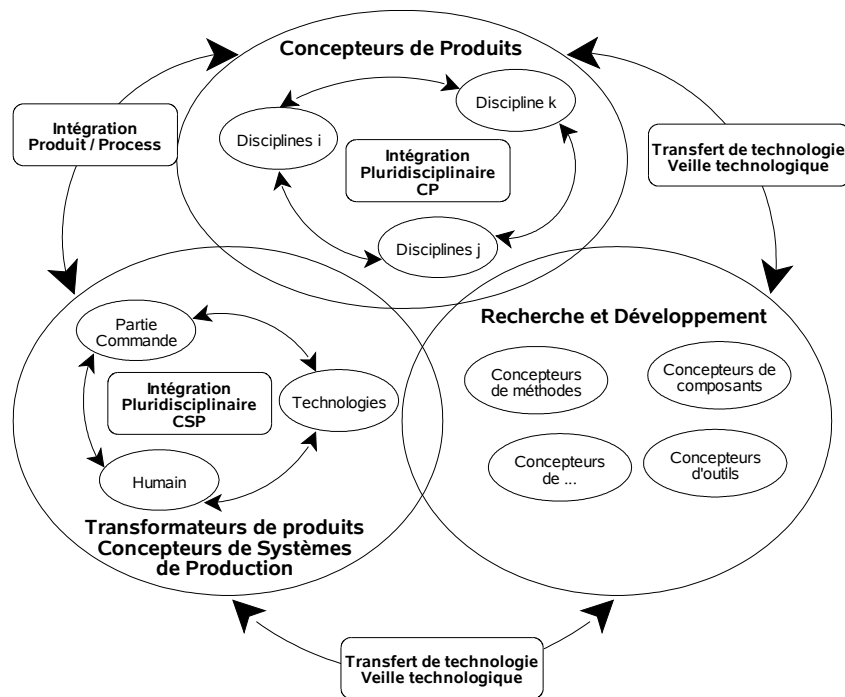


Figure 45 : Disciplines, acteurs et interactions

En décomposant les trois classes d'acteurs identifiées, la coopération interdisciplinaire au sein de chacune d'elles est évidemment mise en évidence. En plus de ces interactions au sein d'une même classe, ce diagramme permet de mettre en place la nature des deux types de relations suivantes :

- intégration produit/process, pour l'interaction entre les concepteurs du produit et ceux du système de production,
- transfert de technologie et veille technologique, entre la recherche et développement et les concepteurs du système de production, ou entre les concepteurs du produit et la recherche et développement.

La démarche de conception d'un centre d'Usinage Grande Vitesse, détaillée dans [Vidal 2004], illustre ces interactions. Les échanges entre le client (groupe PSA) et le fournisseur (groupe PCI), sur la base d'un cahier des charges, permettent tout d'abord d'identifier les caractéristiques attendues du système de production, sur les points de vue :

- Financier : possibilités d'investissements, évolutivité de la machine dans sa future implantation,
- Technique : cadence de production, qualité des produits, rendement,
- Organisationnel : ergonomie, fiabilité, environnement.

Une fois cette étape (qualifiée « d'étape de négociation ») passée, la démarche de conception présentée met en évidence la pluridisciplinarité inhérente à ce type de système. Les disciplines propres à la construction de machines de production forment le cœur du savoir-faire : commande, technologie de la structure et des composants, industrialisation de produit. La nécessité de prévoir les interfaces entre le centre d'usinage et son environnement force à intégrer les disciplines supplémentaires telles : l'ergonomie, la sécurité, la maintenance.

D'une manière plus générale, dans [Williams 1992], l'auteur montre qu'il est nécessaire d'intégrer lors de la conception des systèmes de production les architectures :

- des systèmes d'information,
- des ressources humaines et de l'organisation du système de production,
- des moyens de production et de services au client.

[Girard 2004] conduit au travers de son approche de conception des systèmes de production à traiter en détail la synchronisation au sein des chaînes décisionnelles. Ces dernières sont relatives à la mise en place et l'exploitation des ressources, à la conception des produits transformés, ainsi qu'à la coordination entre ces deux chaînes. Les interactions du type transfert de technologie n'y sont pas détaillées.

L'intégration de ces disciplines au cours du processus de conception passe par la création d'espaces partagés de conception. Le prochain paragraphe a pour objet de les analyser, par l'intermédiaire des ressources partagées employées.

1.3.2.2) Outils de communication

Les acteurs impliqués dans le processus de conception utilisent des ressources (partagées ou non) pour concevoir un système, matérialisant les fonctions issues d'une conception fonctionnelle [Williams 1992]. La première étape d'une méthodologie de conception dite « intégrée » consiste en effet « à transformer les spécifications fonctionnelles d'un produit en un ensemble de solutions techniques » [Brissaud 2000], qui servent de support à la communication entre les acteurs impliqués. Ce mécanisme est souligné dans [Poveda 2001]. L'auteur y propose un état de l'art des outils développés pour faciliter une démarche de conception intégrée. Il cite les outils DFX (Design For X) : Design For Assembly, Design For Manufacturing, Design for Machining, Design For Recyclability. Les contraintes issues des différentes étapes du cycle de vie du futur produit sont intégrées dès la phase de conception.

Ces outils se caractérisent par leur aptitude à ne pas seulement chercher à « transformer des spécifications fonctionnelles en spécifications techniques pour obtenir la garantie d'un produit compétitif » mais aussi à fournir un espace partagé de conception. D'autres travaux viennent compléter ces outils, par la proposition d'outils informatiques dédiés à la gestion des équipes de projet multidisciplinaires, comme [Bonney 2000], [Harding 2003], [Lara 2000], [Pena-Mora 2000], [Deshayes 2003].

Dans le cadre de la conception intégrée produit/process [Eversheim 1997], un modèle de référence est proposé pour que l'intégration entre la conception du produit et celle la planification de la production (ordonnancement des phases et des opérations et choix des moyens associés) soit efficace. Les éléments assurant la communication au cours des activités de conception du système de production sont les informations liées au système technique (le produit). Elles formalisent l'évolution de la connaissance des besoins initiaux. Le support de communication est l'image de la connaissance, commune à tous les acteurs du projet, de la définition du produit.

De tels mécanismes sont illustrés dans [Vidal 2004] pour la conception d'un centre d'usinage. La communication se fait successivement par l'intermédiaire du

cahier des charges, pour la relation client-fournisseur, ou de modèles numériques, pour les acteurs du projet. Ces modèles, appelés « esquisses », sont des modèles CAO partiels de la solution. Ces esquisses modélisent les architectures potentielles de la solution, intégrant les disciplines importantes liées au produit. Dans ce cas, la communication interdisciplinaire et la prise de décision s'appuie toujours sur un modèle conceptuel (assemblage CAO) et non sur un modèle fonctionnel, représentant des éléments concrets, compréhensibles par tous les intervenants.

Ces travaux et ces exemples montrent que l'intégration entre les disciplines lors d'une conception intégrée ne se traite pas uniquement au niveau conceptuel sur les fonctions, mais aussi sur « des paramètres jusqu'alors traités tardivement en aval (et donc souvent trop contraints pour être abordés de manière optimale) ». Ces paramètres font partie des spécifications, et ne seront pas remis en cause. En effet, « l'utilisation d'outils d'ingénierie concurrente suppose une architecture fonctionnelle donnée. Lorsque le processus commence, les besoins à satisfaire et les fonctions sont considérés comme des données »[Loureiro 2003].

1.4) Synthèse des besoins

Les besoins méthodologiques issus de l'étude de l'introduction d'une nouvelle technologie, telle que l'Usinage Grande Vitesse, peuvent ainsi s'exprimer suivant les axes du cube CIMOSA, ou de l'architecture de référence GERAM :

- **Instanciation**

Le niveau d'instanciation doit, dans le cadre de cette thèse, correspondre au « niveau Partiel » proposé par CIMOSA et GERAM. Les modèles et démarches à mettre en jeu doivent être valables pour l'ensemble des applications d'usinage, indépendamment de toute application particulière.

Le « niveau Générique », correspondant à tout type de projet d'introduction d'une nouvelle technologie, peut figurer parmi les perspectives de ces travaux.

Cette instanciation doit assurer la robustesse des concepts et démarches à construire ; pour finalement assurer la robustesse des systèmes de production à concevoir. La robustesse d'un système se définit par sa « propriété à satisfaire un ensemble donné de spécifications, bien que des changements se produisent, une fois que le système soit entré en service, dans son environnement ou en son sein, par rapport aux états nominaux ou prévus de l'environnement ou des paramètres de conception du système » [Saleh 2003].

La robustesse d'une méthode de conception se définit quant à elle, par son aptitude à « obtenir un produit dont les performances sont insensibles à la variabilité de sa fabrication, et aux variations de l'environnement dans lequel il est utilisé » [Saleh 2003].

- **Dérivation**

Le peu de travaux de formalisation des étapes de l'avant-projet et leur enjeu primordial, ainsi que l'ampleur et la diversité des travaux menés dans les phases de conception détaillée (illustrée notamment par l'état de l'art sur

les impacts de l'UGV ou des pratiques de la conception intégrée) nous poussent à nous focaliser vers les premières phases d'un processus de conception.

Les concepts extraits des phases d'implémentation, d'opération et de démontage, (tels les impacts des changements, les meilleures pratiques, les propriétés des produits, les dysfonctionnements potentiels, etc...) ont besoin d'être pris en compte dès les phases amont du projet. Ces phases incluent l'identification des besoins jusqu'à la rédaction d'un cahier des charges, en passant par la conceptualisation. C'est pourquoi, l'opérationnalisation des concepts et sa réciproque, la conceptualisation de l'opérationnel, sont recherchées.

• **Génération**

L'analyse menée dans les paragraphes 1.1 et 2.2 de ce chapitre montre que la conception intégrée de systèmes de production met en jeu des équipes pluridisciplinaires, qu'il s'agit de faire communiquer. Cela s'appuie sur des représentations partagées par l'ensemble des acteurs pour que :

- chacun soit informé du niveau de connaissance du système à chaque instant du projet et puisse intégrer les connaissances apportées par les autres disciplines ;
- chacun soit capable de construire sa propre vue conceptuelle, avec le vocabulaire et les outils propres à sa discipline, pour faire évoluer l'état de connaissance du système.

Nous avons démontré que les représentations partagées proposées dans la littérature ne sont pas purement fonctionnelles. Des informations, traduisant l'évolution du niveau de connaissance d'un cahier des charges initial, y sont toujours associées. Néanmoins le besoin de représentations partagées, construites par le biais de ressources partagées, est identifié. Cette construction implique le besoin d'une instrumentation de la méthode, par une démarche d'application des ressources et modèles.

2) Approches existantes en avant-projet

Ce paragraphe est consacré à l'analyse des méthodes de conception de systèmes de production proposées dans la littérature, dans le cadre général de :

- La modélisation d'entreprise,
- L'évolution des systèmes de production,
- La prise en compte des enjeux économiques.

En effet, la conception intégrée pluridisciplinaire est incontournable dans chacune de ces problématiques. L'analyse est structurée suivant les trois classes de besoins recensées.

2.1) Ressources partagées en avant-projet

Ce paragraphe présente une analyse des méthodes de conception existantes en phase d'avant-projet, qui mettent en œuvre, au moins partiellement, les bonnes pratiques de la conception intégrée, dans le domaine de la modélisation d'entreprise.

Nous y démontrons les limites des approches où les fonctions sont exploitées pour construire un espace partagé de communication.

2.1.1) Contexte de la modélisation d'entreprise

La modélisation d'entreprise [Vernadat 1999] concerne la représentation et les méthodes d'analyse pour l'ingénierie de la conception et l'automatisation d'opérations dans l'entreprise, à différents niveaux de détail. Ils vont de la modélisation générale, à la re-conception, la conception détaillée, l'analyse détaillée et l'évaluation des performances. Cela justifie son examen dans ce contexte.

Les principes de toutes les architectures de référence reconnues (déjà citées au §1.1.1 de ce chapitre), ou en cours de discussion au niveau international, généralement représentées par une structure cubique, montrent que toute démarche de modélisation d'entreprise doit comprendre [Berio 1999] :

- Trois types de flux fondamentaux au sein ou à travers de l'entreprise :
 - Flux de **matières** (objets physiques comme des produits, des outils, des matières premières,...) ;
 - Flux d'**informations** (comme des documents, des données, des fichiers informatiques, des communications téléphoniques, ...) ;
 - Flux de **décision/contrôle** (comme le séquençement des opérations).

- Quatre vues de modélisation :
 - Vue **fonctionnelle** comprenant les fonctions de l'entreprise (ce qui doit être fait) et le comportement de l'entreprise (dans quel ordre le travail doit-il être fait) ;
 - Vue **informationnelle** identifiant quels sont les objets qui doivent être transformés et ceux qui doivent être utilisés ;
 - Vue **ressources** identifiant qui et/ou quoi fait quoi ;
 - Vue **organisationnelle** identifiant les unités organisationnelles et leurs relations, (qui est responsable de quoi ou de qui, qui a l'autorité sur quoi, ou sur qui,...) ;
 - D'autres aspects peuvent être considérés, comme une vue économique, une vue ergonomique, ...

- Trois niveaux de modélisation :
 - La définition des besoins : pour représenter « la voix des utilisateurs », c'est-à-dire ce qui a besoin d'être exprimé en détails et sans ambiguïtés ;
 - La conception du cahier des charges : pour définir de façon formelle une ou plusieurs solutions satisfaisant l'ensemble des besoins, et pour analyser leurs propriétés et en sélectionner la meilleure.
 - La description de l'implémentation : pour décrire en détails la solution d'implémentation, prenant en compte les contraintes techniques physiques.

Ces trois axes sont représentés sur la figure (46), selon une structure cubique.

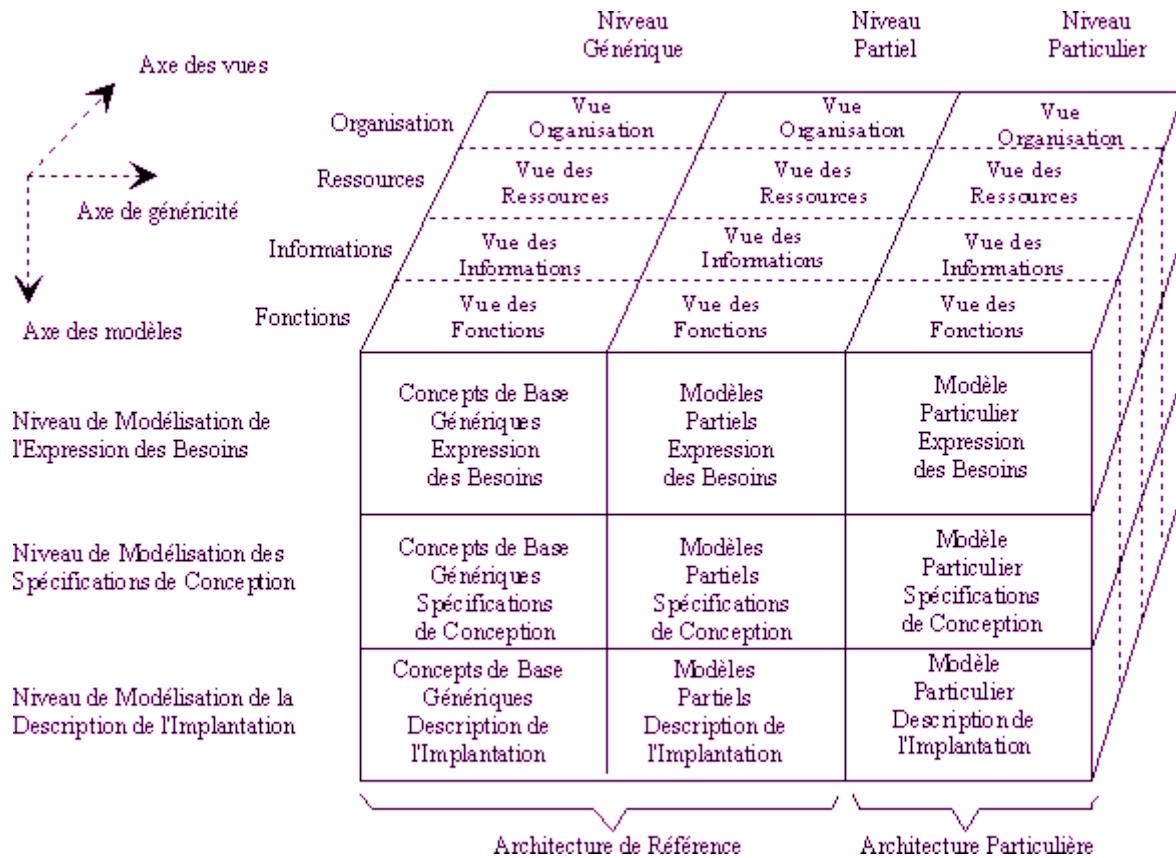


Figure 46 : Architecture de référence de CIMOSA [Vernadat 1999]

2.1.2) Discussions autour des dysfonctionnements

Ces approches fournissent les concepts de modélisation nécessaires pour modéliser n'importe quelle partie du système entreprise. L'accent est mis plus sur la dimension produit (le modèle à construire) que la dimension processus (la démarche de construction du modèle). Celle-ci reste à un niveau macro, qui n'offre pas toujours un guidage suffisant à l'utilisateur.

C'est pourquoi, l'utilisation combinée de démarches éprouvées dans chacun des domaines, en facilitant le partage des différents concepts utilisés, est une approche intéressante [Kiefer 2000]. En ce qui concerne l'avant-projet, ces démarches se structurent généralement autour d'une étape d'analyse dont le but est la définition structurée des besoins des utilisateurs. Dans la méthodologie PERA [Williams 1992], qui est un exemple représentatif des travaux en modélisation d'entreprise et particulièrement pour le développement de systèmes de production, la définition des besoins des utilisateurs résulte des phases suivantes, dont les définitions ont été données dans le paragraphe 1.1.1 :

- **phase de conceptualisation**
- **phase de définition** : lors de cette phase sont définis les besoins pour mener à bien les mises en œuvre, les tâches, les modules et les « macro-fonctions » nécessaires pour ces besoins, et enfin les diagrammes de connexion.

- **phase de conception fonctionnelle** : spécification des choix initiaux en termes d'architecture.

La problématique du processus de conception transformant des besoins initiaux en cahier des charges de solutions émerge. L'étude des approches existantes en modélisation d'entreprise montre que les phases correspondant à cet avant-projet sont généralement structurées autour de démarches d'analyse top-down, et de la construction de modèles conceptuels. Peu de travaux vont jusqu'à la préconisation concrète de méthodes de travail en phase d'avant-projet.

La méthodologie GRAI-GIM [Chen 1997], largement inspirée de la méthode GRAI dédiée à la conception des systèmes de décision, apporte cependant quelques éléments de réponses intéressants. Tout d'abord, la démarche débute par une phase de définition des acteurs. Ces acteurs sont répartis en cinq groupes : de pilotage, de synthèse, d'analystes/spécialistes, des interviewés, et enfin de travail. Après une phase d'initialisation et de définition du domaine d'étude, il y a analyse et discussion autour des dysfonctionnements du système existant pour définir des besoins utilisateurs consolidés. C'est cette définition du domaine d'étude, issue d'une discussion autour des problèmes qui permet l'émergence du système cible à concevoir. C'est le concept de « point à discuter » qui contribue à la création, en début de projet, d'un espace partagé de communication.

Cependant, GRAI-GIM ne propose pas de définition formelle des points à discuter. Une telle définition pourrait servir de support d'analyse à l'avant-projet et permettrait de le structurer plus efficacement. C'est d'ailleurs ce qui est proposé pour les projets de développement de Systèmes d'Information dans [Goepp 2003]. De même que pour la démarche proposée dans GRAI-GIM, les étapes amont du processus du développement se structurent autour de **la mise en évidence des problèmes à résoudre**. Cette démarche est complétée par un cadre générique de problèmes-clés qui donne **un ensemble générique de problèmes à résoudre** durant le projet de développement de Système d'Informations.

Ces derniers sont construits à partir d'une analyse dialectique telle qu'elle est proposée dans OTSM-TRIZ [Khomenko 2002]. Ce type d'analyse a pour objectif la compréhension en profondeur des problèmes d'un domaine particulier. La conception de l'architecture du Système d'Information cible se fait à partir de la reformulation de ces problèmes clés.

2.2) Méthodes pour l'évolution des systèmes de production

D'après [Messaoudene 2003], « la mise en place de l'évolution doit s'appuyer sur une méthode afin de concevoir le système de production et d'obtenir une visibilité des conséquences de la conception sur les performances du système existant ».

Les méthodes d'évolution recensées ([Goepp 2003], [Malhéné 2003], [Messaouedene 2002] et [Salamatov 1999]) s'appuient toutes sur les concepts fondamentaux suivants :

- Le but idéal à atteindre (le « Should Be » pour Malhéné et le « Résultat Idéal Final » pour Salamatov)

Pour Malhéné, « SHOULD-BE » correspond à l'objectif fixé par l'entreprise. Il est associé à un horizon stratégique. Comme l'environnement du système est en perpétuelle évolution lui-aussi, cette cible « idéale », ne

peut pas être atteinte. La différence entre la cible « idéale » et l'objectif réaliste est exprimé par le niveau de performance opérationnelle attendu par l'entreprise. L'ampleur du changement à mener dépend évidemment du « AS-IS », l'état initial du système.

- Un processus de conception centré sur le traitement des problèmes ou des dysfonctionnements du système.

[Hinde 1995] et [Chen 1997] se servent de la reformulation des problèmes initiaux, comme ressource partagée de communication. [Goepf 2003] propose une formalisation des problèmes génériques, justifiant l'engagement dans un processus de changement, pour l'évolution des systèmes d'information. Enfin, [Messoudene 2003] fournit une liste exhaustive des problèmes à résoudre lors du processus de mise en place du Lean Manufacturing.

- Une planification de la trajectoire d'évolution (les « STEP » et la vision Multi-écrans ou « 9 écrans »).

L'intervalle de temps entre deux étapes (STEP) successives correspond à la période stratégique. C'est le délai au bout duquel l'entreprise doit reconsidérer sa trajectoire. Cette trajectoire caractérise la dynamique de l'évolution. Le système décisionnel juge de l'accessibilité des solutions. Pour être accessibles, elles doivent avoir un sens physique et leurs performances ne doivent pas se limiter réciproquement. Il juge également de leur pertinence par l'analyse de la participation des performances locales à l'amélioration des performances globales. La figure (47) illustre l'ensemble de ces concepts.

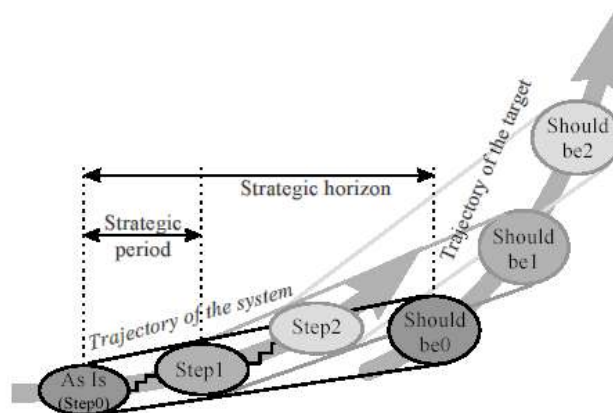


Figure 47 : Processus d'évolution d'un système de production
[Malhéné 2003]

La vision Multi-écrans proposée OTSM-TRIZ [Khomenko 2002], et appliquée dans [Goepf 2003], participe au processus de résolution de problèmes. L'observation du système étudié, pour être pertinente, ne doit pas être tronquée. La vision « multi-écrans » préconise, à chaque instant du processus de résolution des problèmes, de replacer le système étudié à la fois sur une échelle temporelle (passé, présent, futur) et sur une échelle de niveau systémique (sous-système, système et super-système). L'ensemble est représenté graphiquement par un ensemble « d'écrans » où peuvent être placés les éléments relatifs à chaque niveau (cf. figure (48)). Ce plan permet de donner une vision synthétique du système étudié.

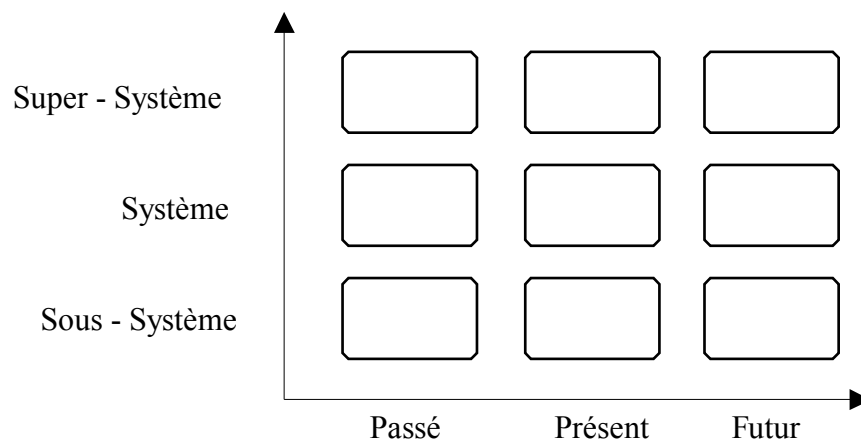


Figure 48 : Vision Multi-écrans d'OTSM-TRIZ [Khomenko 2002]

Comme cette approche n'est pas prévue initialement pour l'évolution des systèmes de production, l'axe temporel n'est pas aussi précis que celui de Malhéné. Ce dernier s'appuyant sur les modèles de GRAI (horizon et période). Par contre, l'approche systémique semble représenter un apport complémentaire. Elle permet de replacer le système dans son environnement ou de chercher à résoudre les problèmes à d'autres niveaux que celui où il sont apparus.

D'autres démarches telles le Business Process Reengineering [Hammer 1993], ou PETRA [Berrah 2003], proposent des guides méthodologiques, pour mener divers projets d'évolution. Ils utilisent des modèles génériques déjà présentés dans cet état de l'art. Ils sont généralement appliqués à des projets de réorganisation industrielle. Leur instanciation est partielle. Cela les rend efficaces dans leurs domaines, mais difficilement transposables à des projets attrayant à la modification de technologies d'usinage.

Compte tenu des différents niveaux d'instanciation rencontrés dans les méthodes, aucune ne peut directement être applicable à l'introduction d'une nouvelle technologie, comme l'UGV. Il est difficile de les transposer à l'intégration de l'évolution d'un procédé.

Par contre, les principes de la planification du processus de changement et de Résultat Idéal Final sont des éléments qui devront être pris en compte dans la démarche, vue leur efficacité dans les domaines connexes. Le niveau de Dérivation des méthodes, c'est-à-dire leur application dès la phase de conceptualisation de l'avant-projet, est lui aussi en accord avec les besoins identifiés.

2.3) Aspects économiques en avant-projet

Ce paragraphe a pour objectif de présenter comment la prise de décision, lors de la phase d'avant-projet (définition des besoins et construction d'un cahier des charges du système cible), peut être assistée par des modèles technico-économiques existants. L'introduction d'une nouvelle technologie dans un système de production peut être également envisagée sous un angle comptable. Les modèles recensés ont pour but de nous aider à identifier quelles sont les caractéristiques sur le point de vue économique de la méthode à construire.

L'exploitation potentielle des grandeurs financières en temps qu'indicateur de performance et comme ressource partagée de communication est d'abord considérée. Puis, nous traitons de la quantification des coûts liés au cycle de vie assistant la prise de décision d'investissement.

2.3.1) Contextes d'utilisation d'études de coûts

Comme toute grandeur quantitative liée au fonctionnement un système, les coûts peuvent être établis de deux manières :

- En observant le fonctionnement d'un système existant,
- En anticipant le fonctionnement d'un système, lors des phases amont de son cycle de vie.

Dans une démarche « a priori » comme la nôtre, la pertinence de l'utilisation des coûts comme indicateur de performance ou ressource partagée de communication entre les acteurs du processus de conception est évaluée.

2.3.1.1) Une mesure de performance

De l'état de l'art réalisé dans [Girard 2004], il ressort que le système décisionnel doit contrôler son système de production pour améliorer ses performances continûment, principalement en terme de coût, de délai, de qualité des produits, mais aussi en termes de réactivité et de flexibilité. Les vues comptables ou gestionnaires permettent de préciser les définitions ayant trait au coût, en temps qu'indicateur de performance.

La performance, dans un sens plus général, a également déjà été placée au cœur de guides méthodologiques d'évolution de système de production. Par exemple, elle est exploitée par PETRA [Berrah 2001], une démarche de réorganisation industrielle. Les coûts, en tant qu'élément de performance, y sont replacés dans un contexte plus global. « Sachant que toute action d'amélioration doit être guidée (justifiée) en termes d'impact sur la performance, au niveau industriel celle-ci peut être vue comme une fonction entre autres de la compétence des hommes et de leur motivation, des processus et technologies associées et de l'organisation de l'entreprise ».

Parmi les six principes de PETRA [Berrah 2001], le cinquième stipule que la démarche de réorganisation est centrée sur la performance. « Des indicateurs de performance pourront être mis en place pour juger de l'état du système à réorganiser et piloter la démarche en tant que telle » .Par contre, aucune proposition d'indicateur de performance pertinent n'y est développée.

La construction de tels indicateurs, pour les systèmes de production, fait l'objet de nombreux travaux. Par exemple, [Goldratt 1984] identifie uniquement trois indicateurs caractérisant les performances économiques d'un tel système :

- Le THROUGHPUT : rythme avec lequel le système génère de l'argent par les ventes ;
- Le niveau des STOCKS : argent que le système a investi pour acheter des objets qu'il a l'intention de vendre ;
- Les DEPENSES DE FONCTIONNEMENT : argent que le système dépense pour transformer les stocks en throughput.

Les modèles de comptabilité analytique proposent un ensemble de techniques d'affectation et d'imputation des charges aux produits, permettant l'incorporation des charges aux coûts [Margerin 1997]. Dans cette vision comptable, le calcul des coûts a pour objectif de quantifier :

- Les coûts des produits intermédiaires ou finis, pour la valorisation des stocks ;
- Les coûts des produits finis livrés aux clients.

Comme l'a montré [Girard 2004], le coût ne peut plus être le seul indicateur de performance, comme il l'a longtemps été. Cette évolution est notamment justifiée par la « lourdeur des calculs à développer, l'arbitraire de certaines répartitions des charges, à l'encontre de la précision des résultats et l'instabilité du niveau des coûts, lorsque le volume d'activité varie » [Margerin 1997].

Cet avis est confirmé par [Hannula 2002], pour qui « les méthodes de mesure (financières) ne devraient pas être trop compliquées, pour servir les besoins pratiques du management. Les approches utilisées dans les études académiques ne sont pas toujours appropriées aux problématiques managériales ».

Il semble néanmoins que les applications pertinentes ont été démontrées dans les situations de contrôle de système. « La mesure financière révèle les résultats des actions engagées, et les mesures non-financières opérationnelles nous révèlent les paramètres influant les performances futures » [Hannula 2002]. Le coût, en temps qu'indicateur de performance, montre donc toute son efficacité dans les situations d'observation de systèmes.

2.3.1.2) Une ressource partagée de communication

Les études de coût peuvent également servir d'interface entre la conception de produit et leur fabrication. Dans ce type de processus, le coût peut être employé comme critère d'évaluation de deux manières [Shehab 2001] :

- En Design-for-cost : utilisation raisonnée des technologies du process d'ingénierie pour réduire les coûts du cycle de vie ;
- En Design-to-cost : conception satisfaisants des besoins fonctionnels pour un coût cible donné.

Par exemple, [Shehab 2001] développe un outil informatique basé sur la quantification des coûts, dans une démarche Design-for-cost. Pour les pièces de mécanique générale (type 2D 1/2), son système permet :

- De recommander la technique d'assemblage la plus économique ;
- De sélectionner un matériau et un un procédé de fabrication, basés sur un ensemble de paramètres de conception et de production ;
- D'estimer le coût total du produit, décomposé depuis le coût d'achat du matériau jusqu'au coût d'assemblage.

D'autres études dans le domaine de l'usinage, comme [Taiber 1996], [Kiritsis 1999], [Kopac 1999], [Shaw 2003], sont des illustrations de l'utilisation des coûts. A chaque fois, les coûts sont employés dans l'objectif d'améliorer l'intégration de connaissances liées à la fabrication des produits lors de leur conception ou lors de la génération de leurs gammes d'usinage. Généralement, les modèles construits pour ces applications sont de deux types [Kiritsis 1999] :

- Les modèles « variants », basés sur des données statistiques d'usinage, disponibles dans l'entreprise.
- Les modèles « génératifs » basés sur une analyse des entités de conception de la pièce, nécessitant des informations détaillées afin de concevoir une gamme d'usinage qui fixe les coûts de fabrication de la pièce. Cette dernière approche offre la possibilité de considérer plusieurs alternatives dans la conception de la pièce ou des choix de fabrication associés, puis d'en comparer les coûts résultants.

Le coût peut donc être perçu comme un concept à la base d'outils d'intégration. Conformément aux propriétés de ces outils montrées précédemment (cf. §1.3.2.2 de ce chapitre), le coût est utilisé comme ressource partagée de communication, dans des processus de conception pluridisciplinaires. Il permet la création d'espaces partagés de communication.

En effet, le coût d'une pièce est souvent le critère final de validation de l'ensemble du processus d'une entreprise : de la conception à la livraison... Les études de [Vidal 2004], [Besnouin 2002] ou [Kopac 1999] montrent que le résultat final de l'amélioration d'une technologie de fabrication et le seul intérêt d'un fabricant est de déterminer comment réduire les temps et les coûts d'usinage, qui sont des facteurs importants influençant le coût de fabrication final du produit.

Dans le contexte de l'introduction de l'UGV, ces deux modes d'utilisation des modèles de coût correspondent aux besoins déjà formulés :

- Le maintien ou l'amélioration des performances des systèmes de production est un élément fondamental du besoin d'évolution des systèmes. Il est nécessaire de montrer comment le coût, comme indicateur de performance, peut être utilisé en démarche a priori.
- En phase d'avant-projet, il semble nécessaire d'évaluer l'efficacité du coût comme ressource partagée de communication.

Les deux prochains paragraphes se recentrent sur les démarches de conception de système de production, pour étudier plus précisément les concepts fondamentaux des modèles de coût, lors des phases d'avant-projet. La performance économique du système de production demande à être surveillée tout au long de sa vie, puisqu'elle fait partie de ses finalités. Les approches basées sur ces principes sont analysées avant d'en étudier des applications dans l'assistance à la prise de décision d'investissements en moyen de production.

2.3.2) Estimation des coûts du Cycle de Vie (Life Cycle Costing Assessment LCCA)

D'après [Durairaj 2002], le LCCA se définit par « une méthode d'analyse systématique visant à évaluer plusieurs solutions de conception, ou des process alternatifs, dans l'objectif de choisir le meilleur moyen d'utiliser des ressources onéreuses ».

Le LCCA fournit un cadre pour estimer le chiffrage des phases de développement, de production, d'utilisation et de retrait d'un produit, dans l'intention

de réduire le coût total d'un projet. La figure (49) montre l'allure des coûts induits suivant les différentes phases du cycle.

Aussi, une utilisation au plus tôt des modèles d'analyse de coût tend à influencer les changements de conception, et permet de fournir les explications des relations entre les paramètres de conception et les inducteurs de coût. D'un point de vue opérationnel, le LCCA permet :

- D'évaluer plus précisément les options d'investissements ;
- De considérer les impacts de toutes les sources de coût, sans se limiter aux coûts d'investissements initiaux ;
- D'améliorer l'efficacité du management de grands projets ;
- De faciliter le choix entre des solutions en compétition.

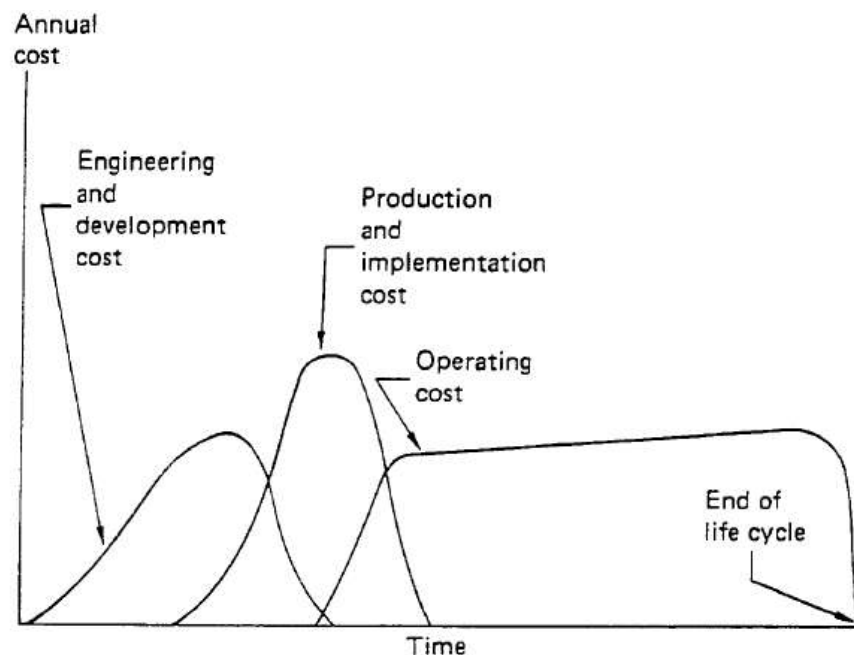


Figure 49 : Coûts le long du cycle de vie des ressources [Durairaj 2002]

[Durairaj 2002] propose un comparatif des différentes méthodes basées sur ces principes. Il utilise des critères de comparaison, dont les plus importants sont :

- L'identification d'alternatives ;
- Le développement d'une structure des inducteurs de coûts ;
- L'identification de modèles économiques ;
- L'estimation quantitative de coûts ;
- La prise en compte de compromis en conception ;
- L'analyse de sensibilité ;
- L'analyse de risques...

Parmi les neuf méthodes recensées, celles de [Woodward 1997], de [Ben-Arieh 2003] et [Livet 2002] autour de l'Activity Based Costing (ABC) et de [Dahlen 1996] concernant les ressources humaines ont été retenues. Elles sont le plus directement applicables à la conception de systèmes de production.

La méthode proposée par Woodward, dans [Woodward 1997], concerne principalement l'acquisition de moyens de production. Les modèles développés dans ce cadre ont pour objectif d'optimiser les coûts induits par la possession de moyens matériels, en prenant en compte tous les facteurs de coût liés aux moyens durant leur phase opérationnelle.

La procédure d'évaluation du coût total d'acquisition d'un équipement de production comprend huit phases.

1. Établir le cycle d'utilisation du futur moyen de production (temps de mise en route, d'utilisation, de coupure, et leur périodicité).
2. Décomposer ces étapes, pour mettre en évidence les facteurs d'utilisation (l'intervalle de temps où le moyen est réellement en fonctionnement).
3. Identifier les inducteurs de coût durant le cycle de vie de l'équipement. Les différentes phases et le profil des coûts associés sont synthétisés sur la figure (49).
4. Identifier les paramètres critiques influençant fondamentalement les coûts durant le cycle de vie : le MTBF (Mean Time Between Failures), le MTTR (Mean Time of Time Repair), la périodicité de la maintenance préventive, le taux d'utilisation des énergies...
5. Quantifier les coûts au taux du marché.
6. Projeter ces coûts sur les phases du cycle de vie, en tenant compte de l'inflation et des taux d'intérêt.
7. Ramener toutes ces valeurs au coût de l'argent en vigueur (indépendamment de l'inflation), pour pouvoir comparer les différentes alternatives.
8. Sommer tous les coûts pour obtenir le coût total.

Nous avons identifié partie des impacts de l'introduction de l'UGV sur un système existant, et les avons replacé dans le formalisme du Modèle des Systèmes Opérationnels de Production. Avant de chercher à quantifier les coûts induits, les différents inducteurs sont recensés. [Woodward 1997] propose une décomposition, correspondant à l'étape 3 de sa démarche. Cette décomposition est également retenue par [Dahlen 1996].

- Les coûts initiaux

Ils comprennent l'achat des matériels et les coûts de structure dépendants, le coût du financement, d'installation, de tests et de formation.

- Les coûts opérationnels

Ils comprennent les coûts de main d'œuvre directe ou indirecte, de matériels directs ou indirects.

- Les coûts de maintenance

Ils comprennent la main d'œuvre directe, les matériels, les pièces de rechange, consommables ou services. La maintenance peut elle-même être divisée en activités de maintenance programmées (préventive), non programmées (curative). La maintenance n'est pas une phase du cycle de vie en elle-même, mais peut induire des coûts tout au long du cycle de vie.

- Les coûts de remise à niveau ou de révision

Ils comprennent la main d'œuvre directe et les matériels, à utiliser pendant ces actions de fréquence très faible.

- Le coût du stock des pièces de rechange, achetées lors de l'acquisition de la nouvelle ressource.
- Le coût de démantèlement

Ils comprennent les coûts de démolition, ou de vente de l'équipement en n'omettant pas d'éventuelles taxes sur la revente. Ces coûts sont à déduire de la valeur résiduelle de l'équipement à la fin de son cycle de vie.

De plus, Woodward structure l'exploitation des facteurs clés, dans l'analyse économique du cycle de vie, pour choisir des équipements matériels (cf. figure (50)). Ces moyens à acquérir, satisfaisants les fonctions du système de production, sont le fruit d'un compromis entre les coûts et les spécifications techniques d'un côté, et les fonctions organisationnelles de l'entreprise.

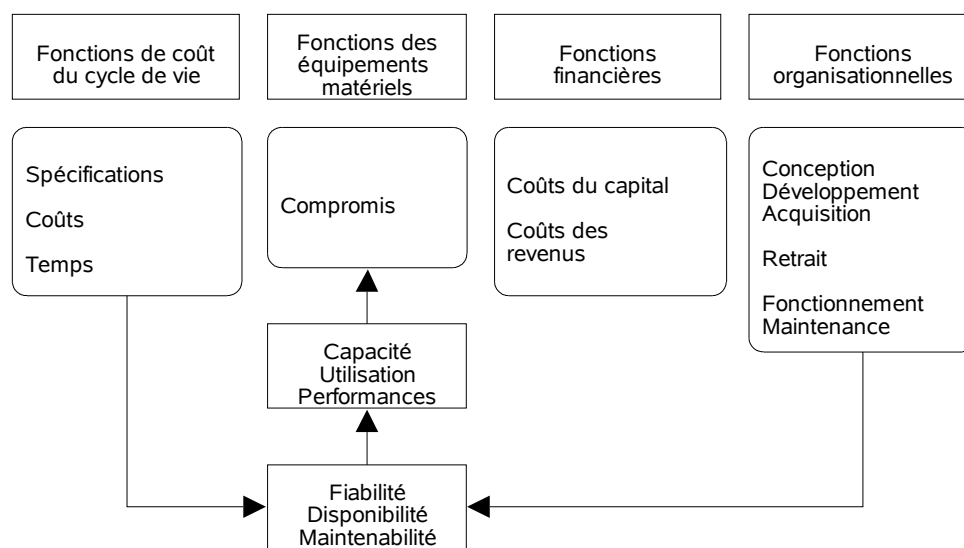


Figure 50 : Méthode de conception basée sur le LCCA [Woodward 1997]

Comme l'affirme l'auteur, cette méthode nécessite un amalgame considérable d'informations, à toutes les étapes du process proposé. L'utilisation de bases de données est indispensable, pour assister les décisions. L'application telle quelle de cette méthode dans le contexte de l'introduction d'une nouvelle technologie, semble, pour cette raison, limitée. En effet, « il est nécessaire de l'alimenter de retours sur expériences ». Or, une entreprise ne peut pas s'appuyer sur son expérience, dans une technologie non encore implantée.

A ce sujet, il n'existe encore que très peu de données disponibles, concernant les exigences de maintenance des équipements [Moraru 2004], ou leur fiabilité en fonctionnement. L'utilisation de modèles statistiques et financiers est recommandée (pour les étapes 4, 6 et 7). Paradoxalement, la connaissance actuelle de la technologie ne permet pas encore d'établir ces modèles.

Néanmoins, la description proposée des inducteurs de coût au long du cycle de vie est une référence pour la méthode à construire. Le modèle ABC complète cette première approche.

La méthode ABC modélise l'utilisation de ressources organisationnelles lors des activités réalisées, et lie le coût de ces activités aux extrants du système, comme des produits ou des services. Cette méthode permet notamment d'améliorer la précision du chiffrage des produits, et fournit des informations des coûts horaires adaptées à la prise de décision. Elle a montré son efficacité dans les démarches industrielles de réduction des coûts indirects. Elle relie différents niveaux d'activités à des composants, à leur mesure (valeur et unité) et à la quantification de leur coût par unité d'œuvre, ou annuelle. Une extension de cette méthode au système de conception a été proposée dans [Ben-Arieh 2003], où l'auteur l'applique pour les phases de conception et de développement.

[Livet 2002] s'est attaché aux systèmes de production. Les composants associés aux activités ont été classés par classes de composants de référence :

- Matériel
- Énergie
- Personnel
- Support d'information
- Zone de l'espace

Peu de travaux ont combiné une analyse économique du cycle de vie et les principes de l'Activity Based Costing. Un des rares exemples est proposé par [Perry 2004]. Cette étude est orientée sur l'optimisation des coûts pour des produits moulés au sable, plutôt que sur l'acquisition de nouveaux moyens de moulage. La structure des inducteurs de coût est basée sur le triplet Procédé de fabrication / Fonction du produit / Matériau à mouler. Les processus, les opérations de parachèvement des pièces et les composants de référence du domaine du moulage au sable sont classés suivant ce triplet. Les relations, entre les paramètres de coût et des indicateurs de production, mises en valeur par cette modélisation facilitent la prise de décisions opérationnelles et la gestion stratégique de l'entreprise.

2.3.3) Décision d'Investissements en moyens de production

De nombreuses applications traitent du choix d'une solution optimale ou de la meilleure alternative, à partir d'un ensemble de candidats, en cherchant à minimiser les coûts du cycle de vie, d'après [Jiang 2004]. Son étude généraliste en est un exemple.

Parmi ces travaux de recherche technico-économiques, deux études quantitatives complémentaires concernant l'aide à la décision sur des investissements en machine-outil ont retenu notre attention. Dans [Bokhorst 2002], l'auteur propose d'intégrer la planification de la production (en prenant en compte les gammes d'usinage des pièces) et le dimensionnement d'investissements en machine-outil à Commande Numérique. En complément, les outils AHP (Analytic hierarchy process) sont exploités pour justifier la sélection d'une machine-outil, en intégrant une vision stratégique [Yurdakul 2004]. Toutes les deux présentent des approches différentes, centrées sur le principe du choix d'une solution optimale, extraite d'un ensemble de candidats.

Le modèle proposé dans [Bokhorst 2002] s'appuie sur les données suivantes :

- Un ensemble de pièces, usinées sur un ensemble de machines-outil ;

- Un ensemble identifié de nouvelles machines CN pouvant satisfaire des opérations sur ces pièces ;
- Des prévisions de commande sur un horizon donné ;
- Des coûts de fonctionnement et d'investissements sur les anciennes et les nouvelles machines ;

L'objectif de ce modèle ([Bokhorst 2002]) est de maximiser la VAN (Valeur Actualisée Nette ou Net Present Value) et ainsi de déterminer :

- Quelles pièces sont à usiner sur quel type de machine, en quelles quantités et sur quelles périodes ;
- Quels investissements en machine sont à effectuer, et quand ;
- Quelles machines actuelles faut-il retirer et quand.

La figure (51) synthétise les données et objectifs.

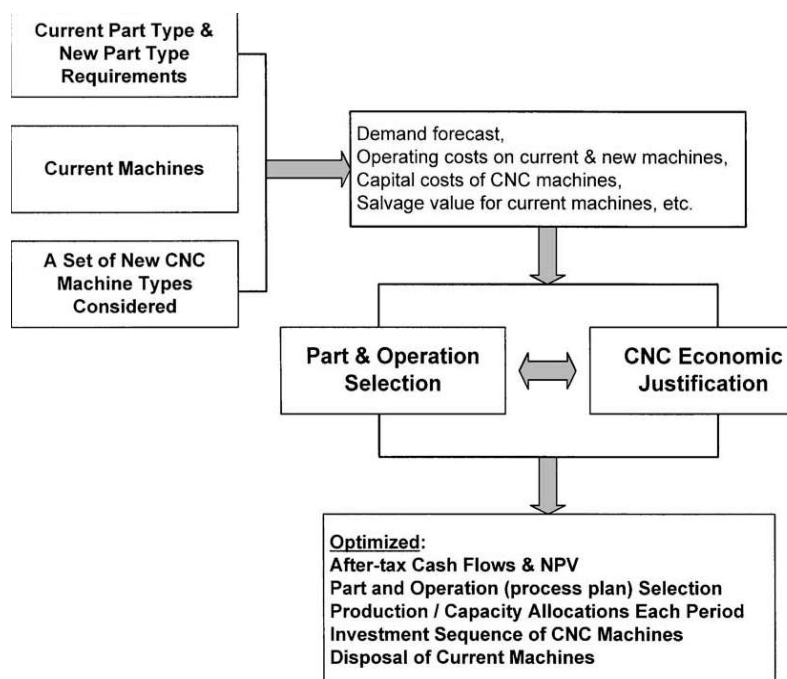


Figure 51 : Données et objectifs de la méthode de [Bokhorst 2002]

Ce modèle, très complet, prend ainsi en compte le cycle de vie des équipements (sous forme analytique), certaines performances du système de production (Qualité des pièces et Flexibilité) et des lois financières. Vu la description des inducteurs de coût de Woodward, il semble que certains aient été omis : la maintenance, la formation des personnels... Cette méthode n'est donc pas véritablement générique, d'autant plus qu'elle s'appuie sur des hypothèses fortes, le choix des nouvelles machines étant une donnée de la méthode.

Elle paraît donc adaptée à la comparaison économique de machines candidates en fin d'étude de faisabilité. Le travail préliminaire de choix de ces candidates, les liens avec la stratégie d'entreprise et les ressources humaines, demeurent cependant non explicités.

Cette approche peut être complétée par celle proposée dans [Yurdakul 2004]. L'auteur cherche à identifier et modéliser les liens entre le choix d'alternatives de machines-outil et les stratégies de production. Le but étant d'améliorer la compétitivité de l'entreprise.

L'application de l'approche AHP nécessite l'accomplissement de trois fonctions :

- Structurer les décisions liées au problème de sélection de machines-outil hiérarchiquement ;
- Déterminer la pondération des composants des décisions hiérarchisées ;
- Synthétiser de la pondération pour classer les scores des alternatives de machines-outil.

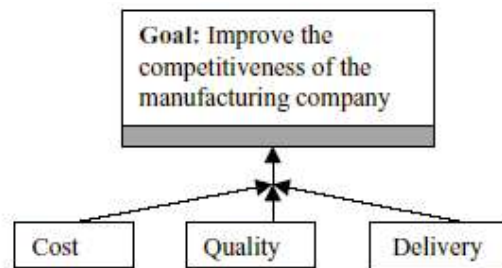


Figure 52 : Décisions stratégiques dans l'investissement d'un équipement de production [Yurdakul 2004]

Toute machine candidate influe sur les trois classes de décision représentées sur la figure (52). Les paramètres caractérisant chaque machine-outil sont :

- La qualité obtenue par le procédé ;
- Le temps d'usinage d'une pièce type ;
- Le temps de réglage de chaque activité ;
- Le nombre d'opérations ou pièces qui peut être effectué sur la machine.

Il est montré les interdépendances entre les paramètres des trois niveaux de décision. Mais, la justification de ces paramètres n'est pas détaillée. La généralité de cette méthode, du point de vue du traitement analytique des alternatives, peut être mise en doute.

Néanmoins, il est clairement démontré la nécessité de mettre en relation le cycle de vie des équipements, les performances du système de production et leur hiérarchisation dépendant de la stratégie de production de l'entreprise, et des paramètres de conception de ces équipements.

2.4) Conclusion

Les besoins de la méthode de conception ont été classés par le biais des trois classes suivantes :

- Son niveau d'instanciation (générique, partiel ou particulier) ;
- Sa capacité à opérationnaliser des concepts, et à conceptualiser de l'opérationnel ;
- Son application appuyée sur une représentation partagée de communication.

Aucune des approches examinées ne semble être directement instanciable à la problématique de l'introduction de l'Usinage Grande Vitesse. Pour simple exemple de justification, le fait que le taux d'utilisation d'une ressource de production soit la donnée de référence de la méthode d'estimation des coûts du cycle de vie, proposée par [Woodward 1997], ne peut être réaliste pour notre problématique : ce taux est une des inconnues à déterminer lors de la conception du système, puisqu'il est potentiellement modifié par la nouvelle technologie.

Néanmoins, la plupart des méthodes recensées proposent une instanciation au niveau « générique », à l'exception semble-t-il des approches économiques basées sur des développements analytiques. Ainsi, les principes des méthodes liées au cycle de vie des ressources, en termes de structures de démarche et d'analyse des inducteurs de coût, semblent bien pouvoir proposer un cadre de modélisation complétant la décomposition du processus de production en sous-processus, proposée au premier chapitre.

Leur instanciation ne vise pas tant à quantifier au plus tôt le coût des changements, dus aux impacts identifiés, mais à participer à la modélisation du changement, par la formalisation (la conceptualisation) des interactions entre les paramètres de conception et les inducteurs de coût.

En outre, une formulation précise des besoins d'un industriel doit permettre de diminuer le nombre de solutions alternatives possibles, et de ce fait raccourcir la durée de la phase d'avant-projet. A ce sujet, l'examen des méthodes de choix des solutions, à partir de candidats, a montré la complexité de l'intégration des données stratégiques et opérationnelles de manière mathématique.

En ce qui concerne la construction d'espaces partagés de communication en avant-projet, des concepts fondamentaux ont été extraits de la littérature. Nous avons démontré que pour assurer l'efficacité des ressources partagées, dont émergent les espaces partagés de communication, les modèles dont elles sont issues doivent mettre en relation :

- Les performances du système, comme caractéristiques de l'évolution,
- Les problèmes, ou dysfonctionnements du système, comme support de discussion et de définition des besoins,
- Les coûts du nouveau système au cours de son cycle de vie.

3) Synthèse méthodologique

Au vu des conclusions de cet état de l'art, la formulation initiale du problème conduit à construire la problématique s'énonçant ainsi :

« Introduire l'Usinage Grande Vitesse » demande de :

- Comprendre pourquoi un système de production usinant existant est amené à changer. Cette nécessité de compréhension revient à modéliser son évolution.
- Connaître la structure du système usinant cible et une décomposition des sous-processus. Ce couple correspond à la forme générique du résultat du processus de conception du système de production : un système est caractérisé par sa structure, et ses activités (cf. chapitre 1).

- Appliquer une démarche de conception en phase d'avant-projet, exploitant cette modélisation.

Le premier chapitre a présenté la structure du système usinant. La décomposition partielle a été proposée. Elle est complétée dans ce paragraphe par sa déclinaison temporelle, son cycle de vie. Pour y parvenir, les principes et la structure de l'estimation des inducteurs de coûts au cours du cycle de vie sont appliqués aux quatre sous-processus identifiés pour cette technologie. La quantification du nombre d'inducteurs de coût et la formalisation des couplages entre ces inducteurs montrent alors la complexité du processus de conception.

L'étude des impacts de l'introduction de l'UGV a montré que la dimension temporelle était une lacune du Modèle des Systèmes Opérationnels de Production. L'influence de l'environnement temporel sur celui-ci n'y apparaît pas. Le second chapitre a montré l'efficacité de la notion de cycle de vie et de l'approche par la détermination des inducteurs de coûts.

Ce paragraphe a pour objet de présenter des visions génériques (structure et processus) du système usinant cible. Tout d'abord, un modèle des inducteurs de coût est proposé, qui est ensuite instancié à un exemple s'appuyant sur des sous-activités (au sens systémique du terme) propres à l'usinage. Dans la deuxième partie, un modèle UML complet du système usinant cible, dans son environnement, est construit. Les couplages mis en évidence montrent la complexité du processus de conception à développer.

3.1) Vision économique du système usinant cible

Les méthodes de conception de type LCCA, adaptées aux systèmes de production, ont été présentées au §2.3.2. de ce chapitre. Ce paragraphe replace l'introduction de l'UGV dans ce contexte. Les trois premières étapes communes à ces démarches demandent d'établir le cycle d'utilisation du futur moyen de production, les facteurs d'utilisation et les inducteurs de coût durant le cycle de vie de l'équipement. Dans une démarche générique, les deux premiers éléments sont des variables de conception du système, dépendant principalement du type de produit à fabriquer.

Nous proposons de synthétiser les inducteurs de coût sur un diagramme de type cause-effet (ou diagramme en arêtes de poisson). Les objectifs de ce diagramme sont :

- Intégrer la dimension temporelle de la vie du système au Modèle des Systèmes Opérationnels de Production.
- Proposer une formalisation de la décomposition des processus identifiés pour le procédé d'usinage.

Les définitions suivantes sont dorénavant utilisées :

- **Ressource :**

Matériel de l'atelier participant à la transformation morphologique d'un produit dans un sous-processus.

- **Mise en conditions d'une ressource :**

Toute activité de commande, de préparation et de transfert (de produit et de ressource), de contrôle et surveillance, est considérée comme mise en conditions de la ressource ou du produit respectif.

- **Équipements de production :**

Ensemble des matériels présents dans un atelier de production. Ils incluent les ressources, et les moyens utilisés pour les mettre en conditions (aussi appelés périphériques).

3.1.1) Diagramme générique

Trois modèles de référence sont combinés pour construire le diagramme des inducteurs de coût pour l'Usinage Grande Vitesse. Les annexes D1 à D5 montrent le développement complet des diagrammes génériques et instanciés aux quatre niveaux du Modèle des Systèmes Opérationnels de Production.

- Le Modèle des Systèmes Opérationnels de Production

Il a été démontré qu'il n'existait pas d'autres modèles des systèmes opérationnels de production, suffisamment générique et assez précis pour l'usinage. La structure et les activités proposées ont été construites spécifiquement pour les processus d'usinage par enlèvement de matière. Sa structure fractale autorise de construire un diagramme générique des inducteurs, déclinable ensuite pour chaque niveau, conformément aux principes de la systémique. Les huit activités de référence (cf. §1.4.4 du chapitre Un) sont placées sur l'axe des ordonnées du diagramme.

- Le modèle du cycle de vie du système est celui de GERAM présenté dans [ISO TC 184 2002].

Les quatre phases retenues du cycle de vie sont celles représentées sur la figure (49), (cf. p.108), à laquelle la phase de démontage est intégrée. Elles permettent de construire quatre classes d'inducteurs de coûts.

- Les coûts d'« ingénierie » : ils englobent l'ensemble des coûts liés au process de conception (avant-projet et projet). Sa décomposition n'est pas l'objet de cette étude. Seule l'évolution du système de production est traitée, et non celle du système de conception.
- Les coûts d'« investissement » : ils correspondent à l'ensemble des coûts induits lors de l'implémentation du système : installation, formation, tests...;
- Les coûts de « fonctionnement » : ils résultent des coûts de production des produits commandés par les clients et les coûts de maintenance préventives et correctives sur les ressources et les moyens périphériques.
- Les coûts de « démontage » du système usinant : seuls les coûts des ressources sont des inducteurs détaillés dans cette classe. En effet, les cycles de vie des moyens périphériques ne sont pas, dans un cas général, synchronisés avec celui des ressources du même niveau.

- La décomposition en inducteurs de coût des activités, durant les quatre phases du cycle, est une synthèse des approches autour de l'Activity Based Costing. En s'appuyant sur la décomposition de [Livet 2002] (cf. §2.3.2 de ce chapitre), les composants associés aux activités sont :

- **Matériel** : cette classe d'inducteurs représente le coût initial de l'équipement nécessaire pour la réalisation de l'activité. Il peut être considéré comme consommable ou non selon la phase du cycle de vie. Le coût des ressources (arête de coupe, porte-outil, montage d'usinage, machine-outil) et des moyens périphériques liés à la mise en condition des ressources sont compris dans cette catégorie. Les énergies, zones de l'espace et supports de l'information sont également inclus.
- **Durée** : l'activité peut être menée par du personnel, ou de façon automatisée. Le coût horaire est le point commun entre ces deux modes.
- **Annexes** : cette catégorie se divise en deux sous-catégories.
 - Les coûts supplémentaires induits par un déroulement anormal de l'activité, se répercutant sur l'activité de transformation morphologique. Un produit non conformes aux critères de qualité induits des coûts supplémentaires, soit par des pénalités financières du client, soit par le traitement en interne. Nous les résumons à des coûts induits par des défauts de précision, et par des défauts de délai.
 - Ceux induits par la mise en conditions des moyens, excluant les ressources, pendant les périodes où ils ne sont pas exploités par la réalisation de l'activité. Ces derniers sont structurés suivant le propre cycle de vie de chaque moyen, non synchronisé avec celui de la ressource dépendante : de sa propre phase d'implémentation à son démontage.

La figure (53) illustre la décomposition élémentaire d'une activité de référence lors d'une des phases du cycle de vie du système. Elle représente le motif de base du diagramme. Il est valable pour :

- Une classe de coût du cycle de vie ;
- Un niveau donné du modèle (noté Niveau i , avec $i=\{1,2,3,4\}$) ;
- Un Produit (i,k) donné : produit k , avec k entier indéterminé, du $i^{\text{ème}}$ niveau ;
- Une Ressource (i,j) donnée : ressource j , avec j entier indéterminé, du $i^{\text{ème}}$ niveau ;
- Une activité de référence donnée.

Dans ce diagramme de type « cause-effet », l'effet étudié est le coût induit par le déroulement de l'activité. Ce coût induit est noté « Outflow » sur le diagramme. Il fait référence à la notion de flux financier (interne au système où vers l'extérieur), conséquence de la dépense induite.

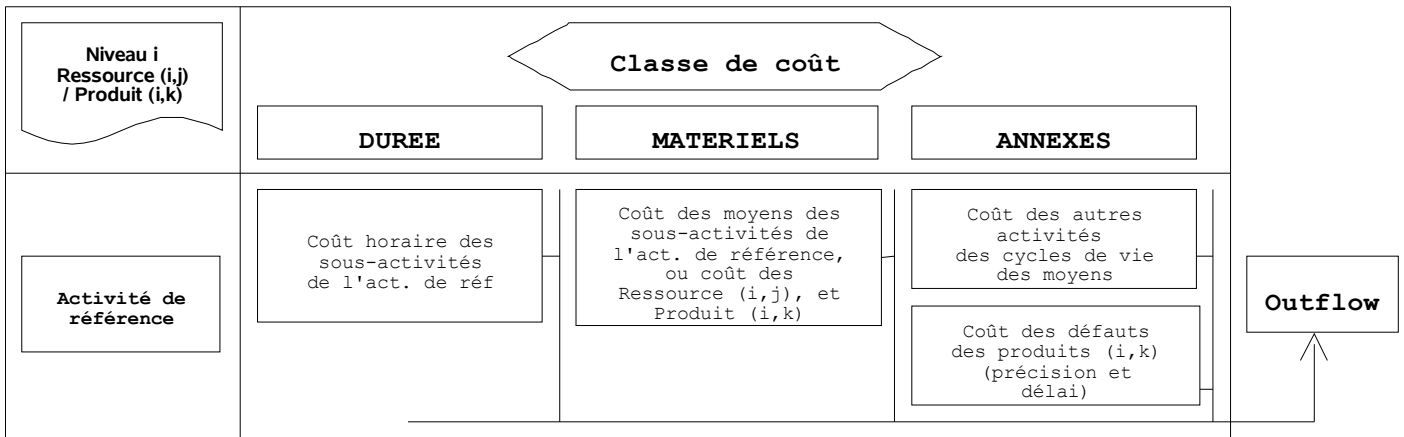


Figure 53 : Motif de base du diagramme des inducteurs de coûts

Les annexes D1 à D5 montrent le développement complet des diagrammes génériques et instanciés aux quatre niveaux du Modèle des Systèmes Opérationnels de Production.

Ces diagrammes permettent de faire correspondre à des fonctions, des classes de solutions technologiques reconnues et efficaces du domaine. C'est pourquoi, le formalisme des diagrammes « cause-effet », générique ou instanciés, est le moyen que nous avons choisi, pour expliciter la traduction sous forme de solutions techniques des fonctions du MSOP.

Dans l'hypothèse (réaliste) de l'emploi de machines-outil à commande numérique, toutes les activités de mise en conditions et d'exploitation des ressources sont détaillées. Les solutions énumérées sont tirées de la connaissance générale du domaine de l'usinage par enlèvement de matière. Au-delà de l'exploitation pour la formalisation des inducteurs de coûts, ces diagrammes représentent ainsi la modélisation des sous-processus génériques du domaine de l'usinage.

3.1.2) Modèle analytique

Les notations suivantes sont utilisées pour les inducteurs de la figure (53) :

- $C_0m(i, a)$: le coût du matériel (moyen périphérique, ou ressource) ;
- $C_hm(i, a)$: le coût horaire d'utilisation de ce matériel ;
- $t_h(i, a)$: la durée de la sous-activité (au sens hiérarchique du terme, et non au sens comptable) ;
- $C_{cv}(i, a)$: le coût des autres activités des cycles de vie des moyens périphériques ;
- $C_{df}(i, a)$: le coût des défauts des produits (précision et délai) ;
- $C_{out}(i, a)$: les outflows, ou dépenses, induites par une activité de référence.

Pour chaque motif de base la dépense $C_{out}(i, a)$ générée par l'activité de référence est de la forme :

$$C_{out}(i, a) = C_0m(i, a) + C_hm(i, a) \cdot t_h(i, a) + C_{cv}(i, a) + C_{df}(i, a) \quad (3.1.1.2.i)$$

L'annexe D1 montre la structure générique pour l'ensemble des activités de référence d'un niveau donné : pour un couple produit k et ressource j. Les instanciations aux quatre niveaux se trouvent sur les annexes D2 à D5.

Le coût total C_{tot} s'en déduit :

$$C_{tot} = \sum_{i=1}^{i=4} \sum_{a=1}^{a=8} C_{out}(i, a) \quad (3.1.1.2.ii)$$

Il est important de préciser que dans la relation (3.1.1.2.ii), l'opération de sommation sur l'indice i doit être pris au sens « Somme des Distinctes ». En effet, nous avons déjà démontré qu'il existait des couplages entre les niveaux. Or, un inducteur de coût ne doit pas être comptabilisé deux fois pour l'obtention d'un même produit.

Ce coût représente les coûts de production et de mise en conditions de quatre couples [produit – ressource] élémentaires :

- Un copeau et une arête de coupe ;
- Une surface et un porte-outil ;
- Une pièce et un montage d'usinage ;
- Un lot et une machine-outil.

Cette configuration minimaliste n'a pas de sens physique. A partir du moment où plus de deux produits par niveau doivent être fabriqués, les couplages entre les niveaux apparaissent et cette décomposition des inducteurs de coût n'est plus suffisante.

Or la détermination des outflows pour un niveau donné demande déjà de quantifier le coût $C_{out}(i, a)$, lui-même exigeant la connaissance de 5 inducteurs de coûts. Connaître C_{tot} demande donc la détermination préalable de 640 grandeurs.

Les couplages entre les activités des quatre niveaux (préparation, production et contrôle), déjà mis en évidence par le modèle fonctionnel, rendent les applications analytiques de ce modèle utopiques, au cours d'un processus de conception.

3.2) Modélisation UML

Nous avons choisi de représenter en langage UML l'ensemble des modèles proposés dans cette thèse. Les objectifs recherchés sont de contribuer à lever toute ambiguïté sur la compréhension et l'application des modèles introduits. Ce langage formel permet également de préparer les bases d'une éventuelle informatisation des concepts.

Les diagrammes présentés dans ce chapitre et dans le chapitre suivant constituent les vues statiques de notre méthode de conception. Ils sont utilisés comme support pour traiter les cas d'utilisation de notre méthode de conception au chapitre Quatre.

Dans ce paragraphe, nous proposons la formalisation des concepts relatifs au Modèle des Systèmes Opérationnels de Production et au cycle de vie de tels

systèmes. Ils sont présentés sous la forme d'un diagramme de classes, sur la figure (54). Cette figure est une vue synthétique des concepts. Les attributs, méthodes et interfaces n'y sont pas représentés. Le diagramme de classe complet se trouve en annexe E1 de ce mémoire.

Les aspects économiques ne sont visibles que sur la version se trouvant en annexe (par soucis de lisibilité). Ils apparaissent sur ce diagramme de vue statique sous la forme d'attributs et de méthodes de classes d'objets. Les classes correspondent aux :

- Activités de chaque sous-processus,
- Produits et ressources concernées,
- Environnements spatiaux et temporels,

Comme ce diagramme représente une vue statique, le cycle de vie du système est limité à une période donnée de sa vie. L'UML nous permet de représenter cette fois-ci le fait que, sur cette période, le système ne produit pas qu'un seul produit par niveau. Les hypothèses adoptées sur la construction du diagramme des inducteurs de coût du paragraphe 3.1 de ce chapitre sont ainsi étendues. L'utilisation de méthodes de calculs statistiques sur les coûts prévisionnels et réels est la matérialisation de l'aspect temporel sur ce diagramme.

En synthèse, nous retiendrons que l'approche hiérarchique habituelle laisse place à une décomposition en niveaux, au sein desquels une même logique de processus transparait. Un couple produit-ressource est mis en conditions opérationnelles, et mis en œuvre suivant la même structure de composants, quel que soit le niveau. Cette modélisation orientée procédé renforce le caractère fractal du modèle des systèmes opérationnels de production.

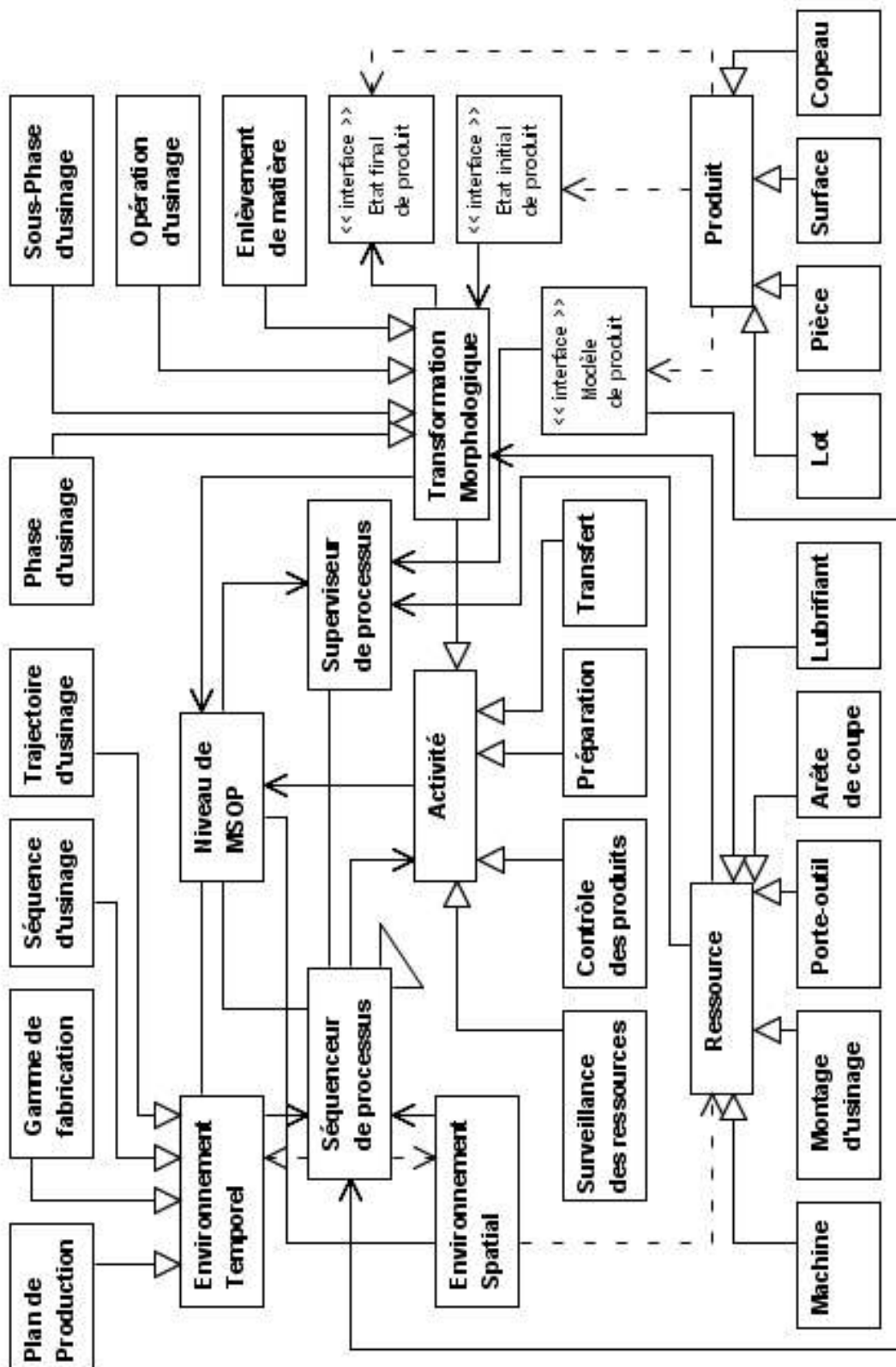


Figure 54 : Diagramme de classes synthétique en UML du MSOP

3.3) Complexité du système usinant et des problèmes

La littérature nous propose deux points de vue de la complexité :

- La complexité d'un **système** :

« Un système complexe est par définition un système que l'on tient pour irréductible à un modèle fini quelle que soit sa taille, le nombre de ses composants, l'intensité de leurs interactions » [Le Moigne 1977].

- La complexité d'un **problème** :

Un problème est dit « complexe », lorsque les spécialistes d'un domaine ignorent sa solution ou bien lorsque la solution type connue ne les satisfait pas ou ne contente pas ses utilisateurs [Salamatov 1999].

Par le recensement des composants des activités, le classement et la quantification des inducteurs de coût le long du cycle de vie ont été proposés suivant deux formalisations complémentaires : des diagrammes de type cause-effet et un diagramme de classes en UML.

La formalisation des impacts de l'introduction de l'UGV dans un atelier d'usinage a ainsi montré qu'un atelier est un système de production où de nombreuses conjonctions sont perçues : influence du nombre d'axes des machines sur l'implantation de l'atelier, relation entre le choix des outils et les trajectoires d'usinage... Les concepteurs du système de production doivent alors faire face à de nombreuses interactions entre des paramètres techniques des composants du système (environnements spatiaux), et des interactions temporelles (environnements temporels). Ils doivent prendre en compte simultanément, au plus tôt dans la phase d'avant-projet :

- L'intégration des autres disciplines complémentaires par la communication interdisciplinaire,
- Les points de vue des futurs utilisateurs du système usinant,
- Les facteurs économiques, en vue d'une rentabilité à long terme du système,
- La cohérence des vues opérationnelles, organisationnelles et stratégiques, en vue d'assurer la cohérence du système.

Tous ces couplages mettent en évidence l'impossibilité, dans l'état actuel de nos connaissances, de construire un modèle du système de production usinant, dont le niveau de définition est suffisamment précis pour répondre à nos besoins. La non-maîtrise complète des paramètres du procédé d'usinage, abordée au chapitre Un, suffit à démontrer l'impossibilité de cette modélisation.

C'est pourquoi, à chaque situation particulière complexe donnée, il n'existe pas, à ce jour, de solution générique pour l'introduction de l'UGV. Par solution générique, nous incluons à la fois la technologie des composants du système et la méthode de choix de ces composants et de leur organisation. Cette combinaison rend le processus de conception complexe. Le Modèle des Systèmes Opérationnels de Production et son extension par le diagramme générique des classes posent néanmoins les bases d'une méthode de conception orientée vers l'intégration d'un nouveau procédé d'usinage.

4) Conclusion

L'état de l'art a permis de démontrer à la fois l'importance et l'efficacité de certains concepts fondamentaux, pour mettre en cohérence les choix stratégiques de l'entreprise et les choix orientant son système opérationnel. Ces concepts sont :

- La compréhension du fonctionnement d'un système de production usinant ;
- La modélisation des composants du système, au sens de la systémique (acteurs et composants physiques) ;
- La modélisation des performances du système usinant ;
- La notion de problème comme base de construction d'un espace partagé de communication.

La conjonction de ces quatre concepts permet la connaissance de l'état du système à un instant donné et, par voie de conséquence, la définition d'un état de référence à atteindre. Seulement, l'étude bibliographique a montré que les liens entre fonctionnement, performances, acteurs et problèmes étaient peu formalisés, ou à un niveau de précision inadapté à l'introduction d'un nouveau procédé d'usinage.

C'est pourquoi la problématique industrielle initiale peut s'envisager, au vue de cette analyse, suivant la problématique scientifique suivante : « **A quels problèmes, l'UGV représente-t-il une solution générale potentielle pour un système usinant donné ?** »

Cette problématique se traduit par la nécessité de définir une méthode de conception visant à spécifier un système usinant cible suivant un processus de conception intégrée. Elle doit permettre d'intégrer les différentes disciplines impliquées dans un tel processus et d'assurer la cohérence globale du système. Cette cohérence passe par la compréhension globale du fonctionnement du système, de ses performances, de ses acteurs, de leurs problèmes, ainsi que de leurs interactions.

Concernant le fonctionnement et la définition des composants du système usinant, les deux premiers chapitres ont proposé deux modèles complémentaires, apportant des éléments de réponse adaptés :

- Le Modèle des Systèmes Opérationnels de Production, modèle fonctionnel décrivant le système opérationnel usinant, mais ne permettant pas de spécifier les environnements temporels et spatiaux.
- Un Modèle économique complémentaire, dont l'application analytique s'avère complexe à mettre en œuvre lors des phases d'avant-projet. Ce modèle sert néanmoins de fond technique pour le développement des deux prochains chapitres. Il ajoute au MSOP, la dimension temporelle du système, en le développant sur son cycle de vie. Il sert de cadre de formalisation de la connaissance générale du domaine de l'usinage, au travers des diagrammes de type « cause-effet » et diagrammes de classes en UML (cf. Annexes D1 à E2).

L'assise commune de ces deux modèles est une décomposition en niveaux du système de production, basée sur les couples produit / ressource. Au sein de chaque niveau, la même logique de processus transformant les ressources en extrants du système (les produits) a été formalisée. Pour des composants différents, les mêmes activités doivent être menées, et les processus supervisés et séquencés.

Par contre, la compréhension des relations entre les performances du système, son évolution et les problèmes des acteurs demeure partielle. La finalisation de la modélisation du système usinant demande la construction d'un modèle supplémentaire. Le schéma de référence proposé par OTSM-TRIZ est une voie d'investigation envisagée pour construire ce modèle.

Au cours du chapitre Trois, la proposition de méthode de conception de système de production usinant est présentée. Il se divise en deux parties : les exposés des principes fondamentaux de la méthode et de la construction du Modèle de Problèmes. Ces deux parties sont basées sur les connaissances générales du domaine de l'usinage par enlèvement de matière.

Chapitre 3 : Méthode de conception du système usinant

Ce chapitre introduit la méthode conception du système usinant, cadrant la phase d'avant-projet, dans un contexte d'évolution vers l'Usinage Grande Vitesse. Nous l'avons intitulée PIA (Problem Integrated Approach). Dans cette méthode de conception orientée problèmes, deux modèles développés spécifiquement (le MSOP et le Modèle de Problèmes) sont utilisés au cours d'une démarche d'application ayant pour objectif la construction d'une architecture du système cible. Cette démarche, en contexte pluridisciplinaire, permet de respecter un cycle d'abstraction, exploitant :

- La vue par les problèmes, pour assurer la cohérence de la définition des objectifs du futur système,
- L'architecture du système, un modèle organisationnel, pour assurer la cohérence de la conception du système.

Dans un premier temps, les principes fondamentaux de la méthode de conception d'ateliers d'usinage sont exposés. Dans un second temps, nous présentons la construction du modèle de problèmes offrant un cadre exhaustif de traitement des problèmes des acteurs du système. La démarche d'application est présentée dans le chapitre Quatre.

1) Proposition d'une méthode de conception

Le chapitre Deux a montré un relatif manque de généralité dans la démarche de conception de systèmes utilisant les procédés d'usinage par enlèvement de matière. L'état actuel des travaux ne permet pas de porter de décisions rapides et robustes, concernant l'évolution d'un système de production.

La diminution des délais de développement et la robustesse des solutions choisies constituent la finalité guidant la construction d'une méthode de conception en méthodes de fabrication. Elle doit aboutir à la rédaction de cahiers des charges pour des investissements dans le domaine de l'Usinage à Grande Vitesse, répondant à des besoins opérationnels et stratégiques cohérents.

Le cycle d'abstraction de la méthode est d'abord présenté. Les modèles nécessaires à son application en sont dégagés, pour mettre en évidence les lacunes à combler.

1.1) Cycle d'abstraction de la méthode

Nous proposons d'introduire la notion de « problème » de manière formelle, dans les phases amont des processus de conception. La notion de problème doit permettre de dégager les concepts fondamentaux sur lesquels doit s'appuyer le futur développement des solutions.

1.1.1) Cycle d'abstraction classique

L'état de l'art des aspects méthodologiques du chapitre Deux (pour les caractéristiques des processus de conception intégrée et des processus de réalisation des modèles intégrés d'entreprise) montre que :

- Le processus de conception des systèmes de production est pluridisciplinaire.
- Un processus de conception pluridisciplinaire exige des espaces de communication, construits autour de modèles partagés de représentation du système à concevoir.
- Pour permettre la communication interdisciplinaire, ces modèles de représentations partagées doivent être suffisamment explicites pour le plus grand nombre. Pour cela, des éléments concrets du système cible, compréhensibles par tous, doivent être représentés, dès l'avant-projet. Il s'agit donc de modèles du niveau « définition des spécifications ».
- Le concept de problème est exploité avec succès, comme thème de discussion, dans les démarches de modélisation interdisciplinaires (cf. §2.1.2 du chapitre Deux).

De plus, le bénéfice du respect, au cours d'un processus de développement dans un domaine donné, des phases d'abstraction puis de conception (cf. figure (55)), en correspondance avec les niveau d'abstraction et les modèles associés, n'est plus à démontrer [Rochfeld 1983]. Il a déjà été intégré dans des démarches de réorganisation industrielles comme PETRA [Berrah 2003].

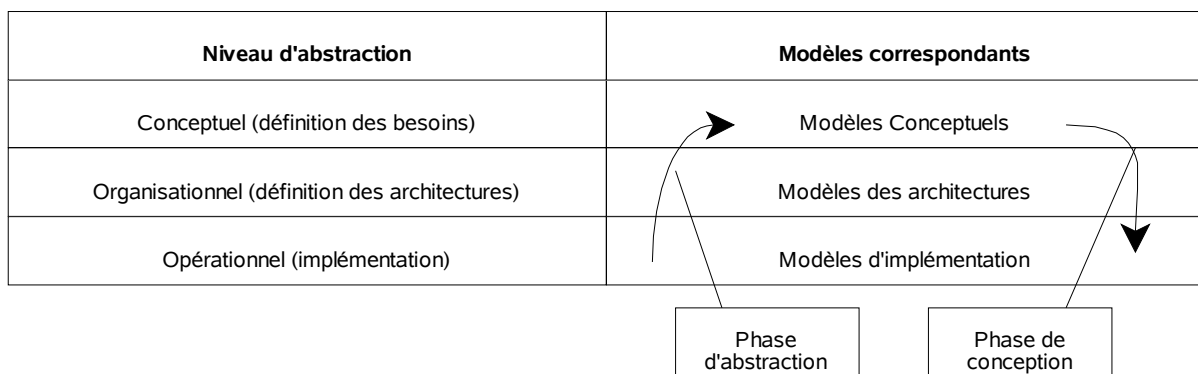


Figure 55 : Cycle d'abstraction classique [Rochfeld 1983]

Dans cette vision du processus de conception, les objectifs du système cible sont définis au début de la phase de conception, et au niveau conceptuel. Une extrapolation directe de cette règle à la conception pluridisciplinaire nous conduirait à enchaîner une phase d'abstraction et une phase de conception basées sur des modèles communs à tous les domaines concernés. Nous allons démontrer que la construction (dans un processus pluridisciplinaire) de l'architecture du système est une activité qui facilite le partage des modèles.

1.1.2) Architecture d'un système de production

Avant de détailler notre proposition de cycle d'abstraction, le concept d'« architecture » d'un système de production mérite d'être plus clairement défini. Nous retenons pour définir l'architecture d'un système, le point de vue de la

systémique. En effet, le Modèle des Systèmes Opérationnels de Production propose une structure des sous-processus et de leurs environnements. Quatre sous-systèmes ont été extraits d'un système de production. Pour assurer la cohérence complète de notre approche, la vision systémique est conservée.

L'architecture d'un système est définie, en systémique, par les descriptions d'un ensemble de composants auxquels sont assignés des objectifs (Quels sont les composants ?), de leurs interactions temporelles (quand interagissent-ils) et de leurs interactions spatiales (quelle est leur position relative ?) [Le Moigne 1977].

Il est important de séparer la notion « d'architecture d'un système » de celle « d'architecture de référence ». Une architecture de référence est définie comme un ensemble cohérent de principes de conception utilisés dans un domaine spécifique. Elle a pour objet de structurer la conception de l'architecture d'un système particulier, en définissant une terminologie unifiée, la structure du système, les responsabilités des composants du système, en fournissant un cadre standard de composants, et en donnant des exemples [Van Brussel 1998]. Ainsi, l'architecture de référence GERAM (présentée dans le §1.2 du chapitre Deux) a été utilisée pour structurer les besoins de la méthode de conception, que nous cherchons à établir pour l'introduction de l'Usinage Grande Vitesse.

Le concept d'architecture est exploité très largement dans le domaine de la conception des systèmes d'information pour les systèmes de production. L'architecture d'un tel système comprend la définition des composants du système, la description de leurs interconnexions (à la fois « logique » et « physique » au sein d'un réseau par exemple) et enfin de leur interaction temporelle (dynamique du système) [Goepp 2003]. L'auteur utilise l'architecture pour décrire les actions attendues de la part de composants (programmes, bases de données, personnes), la dynamique du système (les règles d'évolution du comportement de ces composants à partir d'événements échangés ou observés) et la localisation de ces composants (ressource informatique, poste de travail).

Dans [Liu 1998], un autre exemple d'exploitation est proposé autour de la conception des systèmes de production. L'auteur propose une architecture d'un logiciel ayant pour objectif de contrôler l'intégration et l'implémentation d'un atelier de production. L'architecture de contrôle décrit les spécifications de la décomposition des fonctionnalités du système (ici un logiciel) exigées par le contrôle de l'atelier, et détaille les composants du système en résultant (des contrôleurs) et les relations entre eux.

Dans [Colosimo 2002], l'auteur propose une nouvelle architecture des systèmes de production assurant l'équilibre entre la productivité et la flexibilité recherchées par les sous-traitants du secteur automobile. L'architecture proposée des moyens de manutention des pièces et des outillages est modulaire. Les centres d'usinage peuvent ainsi être utilisés suivant des modes de fonctionnement en parallèle (machines « stand-alone ») ou en lignes de production. En fonction de la planification de la production, l'implantation de l'atelier est modifiée et le sous-processus « phase » est également modifié.

Ce dernier exemple montre que la modélisation par les environnements et les sous-processus, proposée dans le chapitre Un (§2.1), met en fait en évidence les interconnexions spatiales et les interactions temporelles entre les composants du système.

- Les composants du système de production, pour les transformations morphologiques, sont les ressources des quatre niveaux. Leur définition est ainsi d'ores et déjà finalisée.
- Les interconnexions spatiales correspondent aux environnements spatiaux des sous-processus.
- Les interactions temporelles correspondent aux environnements temporels des sous-processus.

C'est pourquoi, le Modèle des Systèmes Opérationnels de Production, complété de la modélisation des environnements peut également être perçu comme une architecture générique du système usinant cible. La figure (56) synthétise cette architecture générique.

Comme le MSOP offre déjà une structuration des activités au sein de sous-processus distincts, définir l'architecture du système de production cible, demande encore de concevoir les interconnexions et interactions entre les composants.

Nous les avons formalisées suivant des architectures des ressources (porte-outil, montage d'usinage, machine et atelier), ou des architectures des ordonnancements des sous-processus (trajectoire d'usinage, séquence d'usinage, gamme d'usinage et plan de production). Nous qualifierons ces deux catégories d'éléments d'architectures, dans la suite de notre étude.

La conception de l'architecture du système cible nécessite la conception intégrée de ces éléments d'architectures. Or, ceux-ci font appel à des spécialistes des domaines afférents. Cette proposition de formalisation sur la base des architectures montre que la construction de l'architecture du système cible doit être partagée pour que les différentes disciplines puissent définir leur propre cible (pour chaque élément d'architecture) dès les phases amont du projet.

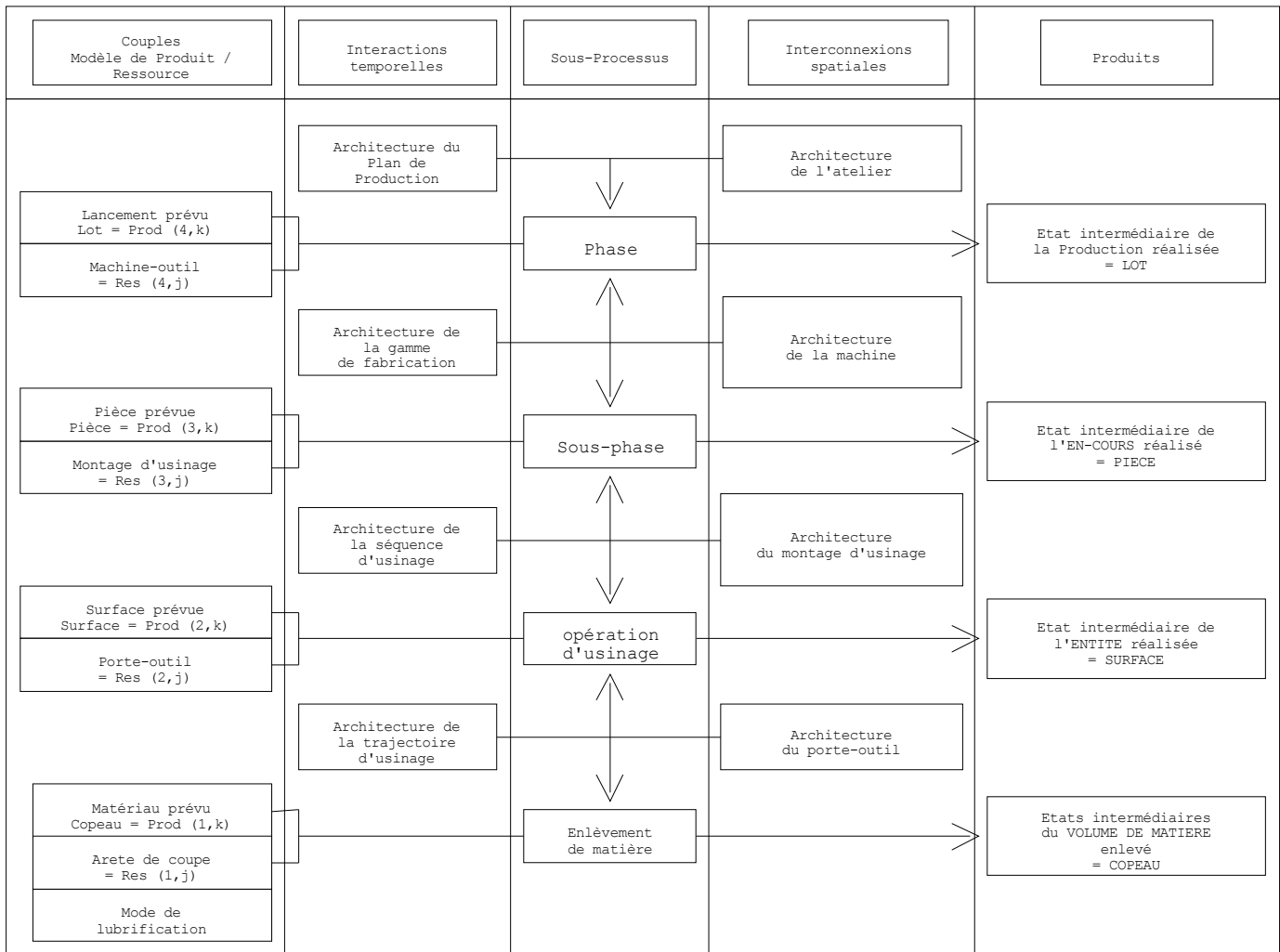


Figure 56 : Architecture générique du système usinant cible

1.1.3) Cycle d'abstraction d'un processus de conception pluridisciplinaire

D'après l'analyse des approches classiques, il semble que les processus de conception pluridisciplinaires soient contraints de se passer d'une abstraction de la situation et d'une définition des objectifs au niveau conceptuel. L'architecture du système cible n'apparaît pas explicitement dans le cycle d'abstraction (cf. figure (55)). Pourtant, le but de ce travail conceptuel est de garantir la cohérence de fond du système cible.

Il est ainsi nécessaire de concilier à la fois le travail de fond au niveau conceptuel, et le respect des contraintes pratiques de communication en conception pluridisciplinaire. L'interprétation des pratiques et concepts dégagés de l'état de l'art permet de formuler la proposition de cycle d'abstraction autour de trois concepts fondamentaux.

Comme le travail initial à partir d'une discussion autour des problèmes est efficace, l'idée et les difficultés afférentes, sont les suivantes :

- Peut-on se servir du point de vue « problème » pour représenter la situation au niveau conceptuel ? La discussion autour des problèmes est le support de la première phase du cycle (cf. figure 57).

- Peut-on ensuite se servir d'un modèle partagé du système à mettre en place d'un point de vue « problème », et de niveau conceptuel, pour produire une architecture du système cible (nécessaire pour poursuivre le travail de conception pluridisciplinaire) ? Cette problématique apparaît lors de la deuxième phase du cycle.
- Peut-on ensuite considérer que le fait que les spécialistes de chaque domaine vérifient la cohérence de l'architecture cible dans leur propre séquence abstraction / conception garantisse la cohérence de fond du système cible ? Chaque domaine reproduit le cycle classique d'abstraction lors des troisième et quatrième phases du cycle. Il s'appuie cette fois sur la construction commune d'une architecture cible du système et non pas sur une unique phase d'abstraction.

L'enchaînement des phases proposé peut se représenter graphiquement tel que sur la figure (57). Les phases successives y sont matérialisées par des flèches.

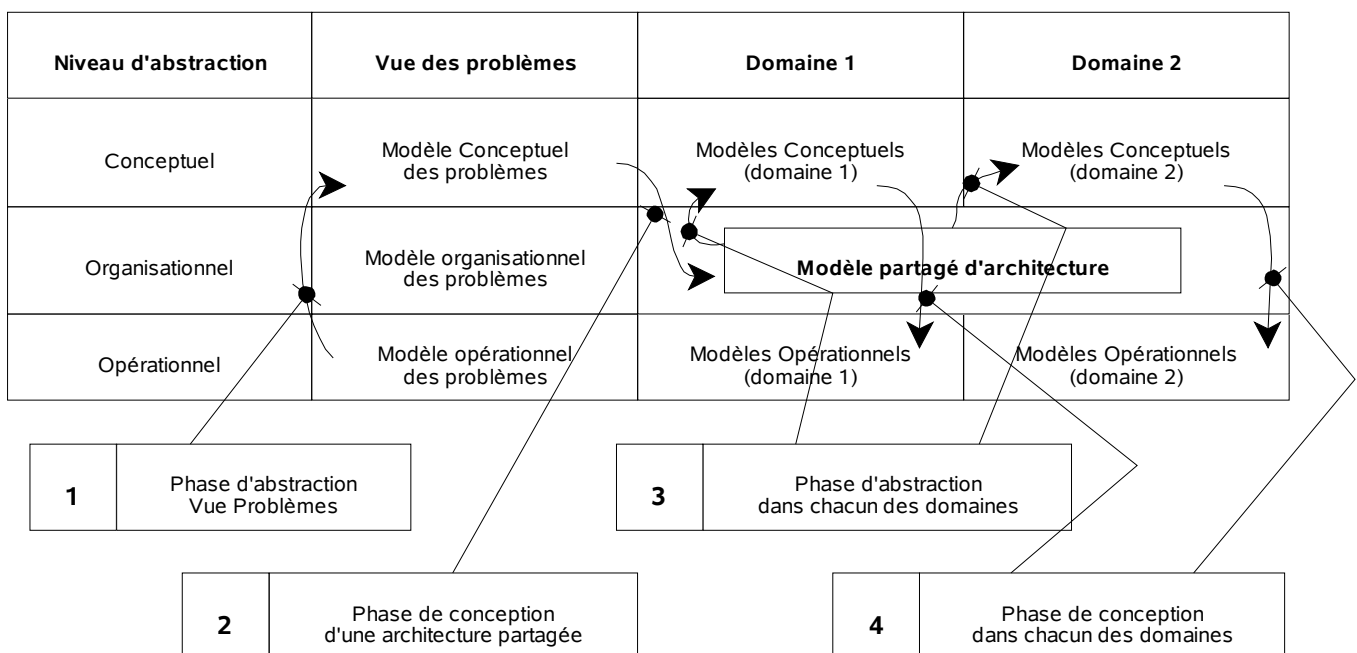


Figure 57 : Cycle d'abstraction proposé

- Phase 1 : phase d'abstraction par les problèmes. Elle vise à mettre en cohérence les vues stratégique et opérationnelle du système de production.
- Phase 2 : phase de conception d'une architecture partagée du système cible. L'espace partagé de communication permet de faire le lien entre la définition des besoins et la construction du cahier des charges des solutions.
- Phase 3 : phase d'abstraction dans chacun des domaines.
- Phase 4 : phase de conception dans chacun des domaines.

1.2) Modèles génériques

L'objectif de la méthode de conception du système de production est la définition d'une architecture cible du système usinant, résultat d'un processus de conception intégrée en phase d'avant-projet. Pour y parvenir, elle utilise des modèles

génériques, dont l'instrumentation est structurée au cours d'une démarche d'application.

Nous proposons d'assurer l'intégration des différentes disciplines, par la construction d'un espace partagé de communication, basé sur une discussion autour des problèmes du système particulier. Ce sous-processus correspond aux phases 1 et 2 du cycle d'abstraction introduit sur la figure (57). Le modèle fonctionnel du système est alors l'objectif des phases d'abstraction et le support de la phase de conception propres aux différents domaines concernés. Elles correspondent aux phases 3 et 4 du cycle d'abstraction de cette même figure.

En s'appuyant sur l'hypothèse d'efficacité du nouveau cycle d'abstraction, les éléments suivant doivent être conçus :

- L'ensemble des modèles génériques permettant la définition de l'architecture cible :

Le Modèle des Systèmes Opérationnels de production, et son développement le long du cycle de vie des ressources, offrent dès à présent une architecture générique du système cible.

Le modèle constituant la ressource partagée de communication n'existe pas encore. Comme nous envisageons l'intégration des disciplines sur la base de problèmes du système particulier, et non sur les fonctions du système, nous nommerons ce modèle, « Modèle de Problèmes ». Il fait l'objet de la suite de ce chapitre.

- La démarche d'application mettant en œuvre les trois premières phases du cycle d'abstraction.

Des éléments relatifs aux deux premières phases ont déjà été présentés dans [Goepf 2003] pour la conception des systèmes d'information. La démarche est présentée dans le dernier chapitre de cette thèse. Son application y est développée sur une étude de cas industriel.

2) Problèmes et contradictions

Ce paragraphe présente le modèle de référence utilisé pour construire le modèle générique, support de la ressource partagée de conception. Pour modéliser les problèmes potentiels d'un système de production, nous nous appuyons sur le modèle de référence proposé par OTSM-TRIZ [Khomenko 2002]. Cette théorie énonce le principe qu'un problème peut se reformuler sous la forme d'une contradiction.

Or, la notion de contradiction, déjà exploitée par les philosophes grecs de l'Antiquité dans la pensée dialectique [Savransky 2000], reste encore sous-jacente à de nombreux travaux. Le compromis est la forme la plus fréquente où elle y apparaît, certes de façon implicite. Sur la base d'un bilan (non exhaustif) des compromis rencontrés dans la littérature relative au domaine de l'usinage, le choix de ce modèle de référence est justifié, dans le paragraphe 2.1. Puis, dans le §2.2, nous présentons successivement le modèle de référence d'abord de façon informelle, puis par une nouvelle formalisation graphique.

2.1) Compromis en méthodes de fabrication

La complexité du système usinant et de son processus de conception a été démontrée. Pour faire face à la complexité des situations de résolution de problèmes, les concepteurs de composants du système et de méthodes ont tendance à raisonner sur la base de la satisfaction de compromis. Ce paragraphe a pour objectif de montrer les types de compromis opérés dans le domaine de l'usinage.

Un compromis se définit comme « un moyen terme, accord par concessions mutuelles des deux parties » (dictionnaire ATILF du CNRS). Le concepteur en méthode, en faisant un compromis, accepte donc, au minimum, de dégrader une grandeur au profit d'une autre.

Des exemples tirés de la littérature du domaine de l'usinage, montrent les types de compromis admis dans le domaine. Le premier concerne ceux opérés entre deux objectifs à atteindre pour le système, un de ses composants, ou un des environnements temporels. Ils prennent souvent la même forme quel que soit l'élément à concevoir ou à optimiser. Le classement des exemples par niveau du MSOP concourt à le mettre en évidence.

Relativement à l'optimisation du processus d'enlèvement de matière (niveau 1), Haber, dans [Haber 2003], avance que « le problème clé en usinage est de trouver un compromis approprié entre l'usure de l'outil et la productivité », en considérant les différents coûts des composants du processus. L'objectif est de choisir les paramètres de coupe, et assurer une durée de vie de l'outil économique. Cela revient à un compromis entre la durée du processus (le délai) et le coût des ressources.

Un exemple relatif à l'obtention de surfaces est donné dans [Kim 2002]. L'auteur cherche à minimiser le temps d'usinage de surfaces gauches en fraisage 5 axes. Il montre qu'il existe deux manières possibles d'y parvenir : d'une part, « usiner dans la direction du débit de copeau maximal » (soit diminuer le délai du produit) et d'autre part de « réduire la quantité de croisement entre les trajets » (éviter la sur-qualité). Il rajoute que le compromis entre les deux modes n'est pas trivial, mais construit ses objectifs sur la satisfaction des deux modes pour trouver les meilleures stratégies d'usinage.

Dans le même domaine, dans [Park 2004], il est précisé que le choix entre un fraisage unidirectionnel ou en zig-zag résulte d'un compromis entre des objectifs technologiques comme la qualité de la surface usinée et le temps d'usinage (soit le délai), qui détermine la productivité.

Dans [Hurtado 2002], l'auteur essaie de trouver un compromis sur le nombre d'appuis à implanter dans la conception de montages d'usinage flexibles utilisant une matrice de plots positionnant les pièces. Ces plots offrent l'avantage de s'adapter à leur géométrie. La conformation du montage à la pièce augmente avec le nombre de plots (beaucoup de petits plots) et la rigidité nécessite peu de plots (faible nombre de plots massifs). Ce compromis concerne deux valeurs d'un même paramètre, relatif à une ressource du niveau 3.

Enfin, Tsubone appuie son étude de la flexibilité des machines sur le compromis entre les effets de la flexibilité et l'ampleur des investissements [Tsubone 1999]. Quel que soit le niveau considéré, les concepteurs utilisent des compromis entre une grandeur économique et une performance du système de production. Cette conclusion renforce la démonstration de complexité du process de conception présentée précédemment.

[Woodward 1997] intègre explicitement cette notion dans sa méthode de conception de système de production, basée sur l'application du concept de cycle de vie. « Optimiser le compromis entre les coûts relatifs aux équipements durant leur fonctionnement assurera un coût du cycle de vie de l'équipement minimal ». La figure (50) (cf. p.110) illustre que le système est le résultat d'un compromis entre les coûts et les spécifications techniques et organisationnelles.

La deuxième classe de compromis est relative aux performances des modèles utilisés pendant le processus de conception, pour atteindre les objectifs (par le compromis) illustrés dans la classe précédente. Par exemple dans [Juan 2003], il est proposé une étude visant à la détermination des conditions de coupe optimales, minimisant les coûts de fabrication, en ébauche UGV d'outillages de mise en forme. Le critère introduit assure un compromis entre la précision du modèle et sa complexité.

De même, [Peigne 2003] montre, dans les conclusions de son état de l'art de la dynamique de la coupe en fraisage, que les méthodes de résolution mises en œuvre, s'appuient sur un compromis entre précision (erreur de résolution numérique et de niveau de détail des résultats), simplicité de mise en œuvre et vitesse de calcul.

Les dualités et les conflits entre paramètres sont donc ancrés dans de nombreux travaux scientifiques, et pratiques industrielles. Pourtant dans le domaine de l'usinage, peu de travaux contribuent à formaliser ces méthodes. Les approches montrées dans [Messaudene 2003] ou [Stratton 2003] pour les systèmes de production (impacts au niveau 4 et plus) sont les seules recensées à notre connaissance. Stratton démontre entre autres que distinguer le « lean manufacturing » de « l'agile manufacturing » se ramène à gérer un compromis entre « fabriquer à bas coût » ou « fabriquer de façon réactive ». Cette formulation s'opérationnalise en « investir dans de la capacité de production » ou « investir dans des stocks ».

D'après [Molet 2003] : « Il est donc assez paradoxal de noter que c'est au moment où les progrès significatifs de l'informatique mettent les outils d'optimisation à la portée des industriels que l'objectif ou les termes du compromis à réaliser deviennent souvent indéfinissables. Une part importante de la décision s'approche donc du pari ou de l'acte de foi alors que l'appareillage gestionnaire n'a jamais été aussi développé et performant. »

Les différents exemples et les contributions à leur formalisation, montrent que que la position de [Molet 2003] peut être transposable au contexte de la conception de système de production usinant. Les moyens de calcul et de simulation n'ont jamais été aussi efficaces, en terme de puissance de calcul, et de prise en compte des paramètres. Mais, les hypothèses de départ se ramènent souvent à la gestion d'un compromis.

Le questionnement suivant est issu de cette état de fait :

- Pourquoi dégrader l'une des grandeurs plutôt que l'autre ?
- Si les valeurs initiales de ces grandeurs ne peuvent être satisfaites simultanément, pourquoi ont-elles été définies ainsi ? En d'autres termes, les besoins ne sont-ils pas mal définis ?
- Pourquoi choisir un couple de grandeurs plutôt qu'un autre ?

La figure (58) propose une illustration de l'opération effectuée lors d'un compromis et les limites de cette approche des problèmes. Un compromis sous-entend qu'il existe une relation entre deux paramètres (représentée par la courbe). Pour chaque paramètre un domaine de fonctionnement «intéressant» est présupposé par le concepteur. Par exemple, si B est le coût d'une opération d'usinage, la zone des faibles coûts est recherchée. Un domaine de fonctionnement est ainsi défini. Trouver un compromis revient à déterminer le couple (A,B) qui se rapproche le plus de ce domaine de fonctionnement.

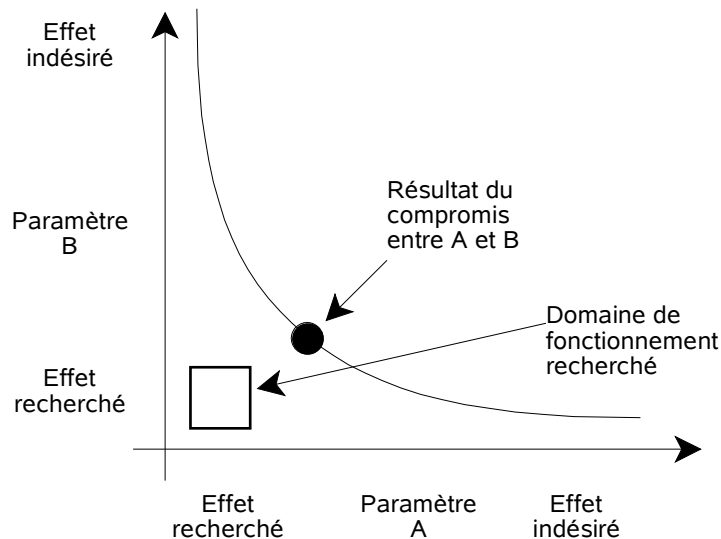


Figure 58 : Mécanisme d'un compromis

En d'autres termes, l'identification des besoins, en phase d'avant projet, passe notamment par la formulation d'objectifs exprimés sous la forme de conflits entre des paramètres ou des performances du système à concevoir. Pourtant les moyens de résolution utilisés actuellement, plus ou moins implicitement, se limitent à la satisfaction d'un compromis. Cette constatation met en évidence, non pas l'aspect réducteur d'un compromis, mais le fait que les concepteurs ont l'habitude de raisonner sur des paires de grandeurs. L'introduction de la notion de contradictions ne devrait pas troubler les modes de travail du domaine.

A ce concept de conflit s'ajoutent ceux extraits du chapitre Deux, tels l'évolution, les problèmes et les performances. Leurs rôles clé dans les phases d'avant-projet nous ont fait choisir OTSM-TRIZ comme modèle de référence ; le seul, à notre connaissance, intégrant l'ensemble de ces concepts.

2.2) Formalisme OTSM-TRIZ

OTSM-TRIZ peut être vue comme une méthode générale d'aide à la résolution de problèmes [Khomenko 2002]. Ses principes peuvent se résumer ainsi :

- Comprendre les causes profondes des problèmes pour en dégager les paramètres en conflit. S'en déduit une formulation des besoins supposée robuste.
- Dépasser le compromis habituel, par la confrontation des lois d'évolution des systèmes et de la définition des problèmes particuliers, pour proposer des concepts de solution.

La figure (59) synthétise l'esprit de cette approche, en s'appuyant sur la description des compromis proposée précédemment. Elle est commentée progressivement au cours de ce paragraphe.

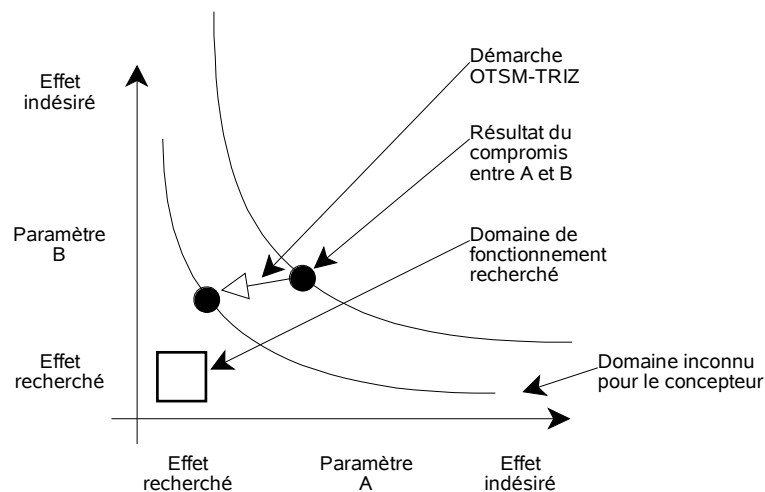


Figure 59 : Apport d'OTSM-TRIZ par rapport à un compromis

Les éléments de cette méthode comprennent trois niveaux :

- Des notions essentielles, les contradictions, constituant un fil rouge dans la réflexion. En formulant les contradictions sous-jacentes à un problème, les paramètres en conflit sont identifiés. L'objectif est d'éviter de devoir satisfaire un compromis construit sur de mauvaises bases (donc s'assurer du choix des paramètres A et B de la figure (59)), et de pouvoir ainsi spécifier les réels besoins.
- Des outils à mettre en œuvre lors de ces activités : la notion de Résultat Idéal Final, formalisant le domaine de fonctionnement idéal à atteindre.
- Des guides méthodologiques permettant d'organiser les activités du processus de conception.

Ainsi, OTSM-TRIZ s'attache aux problèmes difficiles, qui sont définis comme des situations pouvant être formulées par des contradictions. Ces dernières sont ensuite, le point de départ vers des méthodes de résolution, dont la mise en œuvre constitue une application d'autres notions essentielles, détaillées plus en aval.

OTSM-TRIZ est, dans son essence même, construite pour traiter des situations particulières. Mais, elle n'offre pas encore, parmi l'ensemble de ses concepts, de reformulation type, sous forme de contradictions « standards » pour des classes de systèmes connues. Cela signifie, concernant le domaine de l'usinage, que chaque industriel doit a priori construire son propre modèle de problème. Vue la complexité des systèmes usinants, ce processus peut s'avérer fastidieux.

Notre proposition est de construire un modèle de problèmes génériques, auquel toute situation particulière (en usinage) puisse se ramener après reformulation.

Dans un premier temps, les principes de la démarche de résolution de problèmes, proposée par OTSM-TRIZ, et l'explication de la genèse d'un problème sont présentés. Le schéma des contradictions reliant les problèmes, les performances

et l'évolution des systèmes est alors replacé dans ce contexte. La formalisation présentée s'appuie également sur les apports exposés dans [Goepf 2003].

2.2.1) Cycle d'abstraction d'OTSM-TRIZ

Le cycle d'abstraction d'OTSM-TRIZ est développé suivant une échelle temporelle sur la figure (60). Le passage entre situation initiale et solution n'est pas direct. Le cycle proposé structure le raisonnement du concepteur d'une situation initiale, caractérisée par un ou plusieurs problèmes particuliers, à tout d'abord, un problème général (modèle du problème particulier), propre à la classe du système étudié. Cette première étape est la reformulation de la situation initiale, sous forme d'une ou plusieurs contradictions d'évolution.

La deuxième, appelée résolution, permet de passer du modèle de problème au modèle de solution, en mettant en valeur les causes de non satisfaction, par la compréhension des phénomènes en jeu. Une solution générale est construite, toujours au sein de la classe du système. La dernière étape: l'interprétation, consiste à interpréter le modèle pour particulariser sa solution, suivant son système particulier.

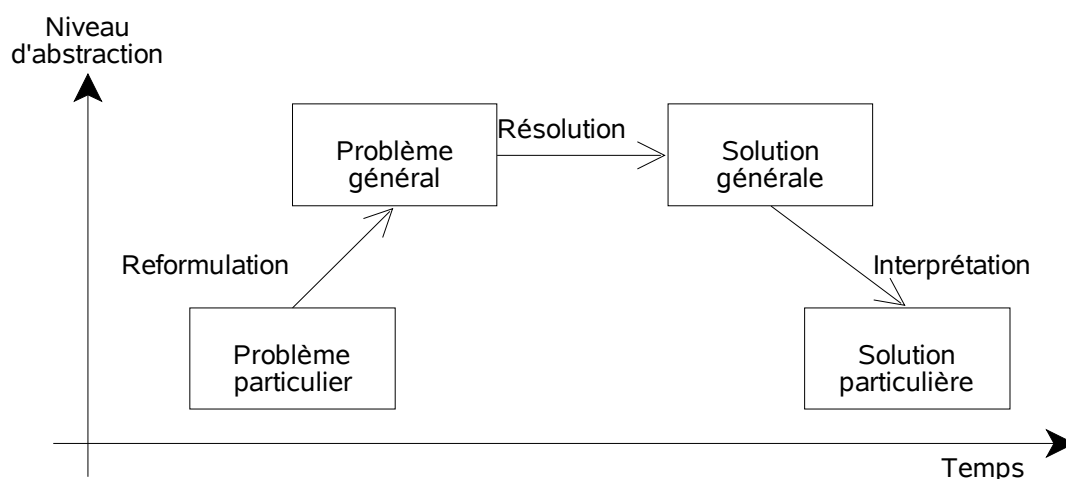


Figure 60 : Cycle d'abstraction d'OTSM-TRIZ [Khomenko 2002]

Au cours de cette démarche, il est fait appel à des modèles de référence :

- Les contradictions : les différents niveaux de contradictions modélisent les conséquences et les causes des problèmes profonds à résoudre.
- Le Résultat Idéal Final et la vision multi-écrans : ces concepts, déjà présentés au chapitre Deux, permettent de structurer le résultat attendu du processus de conception.
- L'intensification des contradictions et l'intégration de solutions partielles sont des techniques permettant de construire les solutions au problème. Intensifier une contradiction revient à imaginer l'effet néfaste du problème de manière amplifiée voire poussée à l'absurde, pour faire apparaître l'essentiel du problème.

Dans ce chapitre, seules les contradictions sont étudiées. Les aspects méthodologiques, complétant ceux déjà définis lors du chapitre Deux, le sont dans le dernier chapitre. OTSM-TRIZ définit deux catégories de contradictions : celles

relatives à la connaissance qu'à le concepteur du système étudié, et celles relatives aux fonctions du système.

2.2.2) Contradictions du concepteur et d'évolution

Le schéma général d'OTSM-TRIZ, expliquant la genèse d'un problème, fait apparaître 5 composants :

- 2 DEMANDES opposées ;
- 2 EXPLICATIONS de la raison de ces demandes ;
- 1 ELEMENT CENTRAL qui doit satisfaire ces demandes opposées.

L'élément central est une personne confrontée à différentes espèces de contradictions (au sens OTSM TRIZ). Concernant la contradiction organisationnelle, l'élément central est une personne (à un certain niveau de connaissances) qui doit résoudre un problème spécifique donné.

<p>< La personne > { ELEMENT CENTRAL }</p> <ul style="list-style-type: none">• < doit avoir la connaissance exigée > { DEMANDE 1 } pour < résoudre le problème > { EXPLICATION de la DEMANDE 1 }. <p>Mais, < la personne > { ELEMENT CENTRAL }</p> <ul style="list-style-type: none">• < n'a pas la connaissance exigée > { DEMANDE 2 } parce que < personne ne le lui a appris > { EXPLICATION de la DEMANDE 2 }.
--

Dans le modèle de référence structurant la démarche d'OTSM-TRIZ, cette contradiction est appelée « contradiction du concepteur ». Elle représente l'étape initiale du processus de résolution de problème. L'Élément Central doit réaliser qu'il n'a pas les connaissances qui pourraient l'aider à résoudre un problème spécifique, correspondant à des conditions spécifiques. La combinaison de cette lacune, en termes de connaissances, et de l'inertie mentale fait naître le problème et par voie de conséquence, l'empêche de le résoudre.

Elle peut, dans un cas général, se traduire par le recours à un compromis (au sens optimisation d'un système existant). Par manque de connaissances, le concepteur se limite à essayer de résoudre son problème en restant sur la courbe de son système (cf. figure (58) p.134).

L'objectif est alors de lui montrer qu'en faisant évoluer le système, en changeant de technologie par exemple, une nouvelle combinaison des deux paramètres en conflit permet de se rapprocher du Résultat Idéal Final envisagé. Cela se traduit par un changement de courbe sur la figure (59) (cf. p.135).

Pour y parvenir, OTSM-TRIZ propose de l'aider en formulant et en appliquant une « Contradiction d'Évolution ». Ce type de contradiction contrôle l'évolution de cette classe de système, d'où son nom (contradiction of evolution ou driving contradiction).

Ainsi, au cours des premières phases du processus de conception, l'élément central doit considérer une famille de systèmes, dont chaque élément a la même fonction. La contradiction dans la connaissance du concepteur amène alors à

formuler la contradiction d'évolution, pour la classe de systèmes. Sans le déroulement du processus de formulation des contradictions d'évolution, la connaissance de la classe de système doit être approfondie pour résoudre le problème.

La contradiction d'évolution sert à mieux comprendre certaines classes de systèmes, ses paramètres importants et les relations conflictuelles entre ces paramètres. Elle permet de mieux comprendre, au sein du système, l'origine du problème. Cette connaissance est utilisée par la suite pour évaluer les solutions.

2.2.3) Contradictions du système

La contradiction du concepteur est attachée à une personne devant résoudre un problème, trouvant son origine au sein d'un système. Dans le but de dépasser le blocage du concepteur et son inertie psychologique, OTSM-TRIZ propose un schéma mettant en contradiction des grandeurs du système. Il décrit comment est évaluée une fonction de la classe du système.

2.2.3.1) Description informelle

Le schéma d'OTSM-TRIZ permet de structurer les paramètres principaux pilotant une fonction d'une classe de système. Il met en relation des performances et des paramètres, suivant trois types de contradictions.

- **Contradiction d'évolution :**

Chaque fonction du système est évaluée par deux éléments de performance. Les valeurs respectives des deux éléments de performance, notés **E_i**, sont contradictoires. Pour améliorer l'un des deux, sans faire évoluer le système, le second est dégradé.

- **Contradiction technique :**

Chaque élément de performance **E_i** dépend de deux paramètres contradictoires, notés **P_{ij}** avec $j=\{1,2\}$. Lorsque dans un système, un des deux paramètres doit être amélioré, une autre caractéristique, ou paramètre, s'en trouve détériorée.

- **Contradiction physique :**

Deux valeurs d'un même paramètre **X**, noté **X_i**, doivent satisfaire simultanément les deux paramètres **P_{ij}**, d'un même élément de performance.

Elle oppose directement deux attentes contradictoires pour le même paramètre d'un système à un même instant de la vie du système. Elle souligne l'opposition littérale, en mettant en évidence le caractère impossible de la situation. La relation entre les contradictions technique et physique s'écrit sous la forme suivante, pour un élément de performance donné :

« Il faut que X_i prenne une valeur X_a car P_{i1}, et il faut que, simultanément, X_i prenne la valeur X_b car P_{i2} ».

Le système est obligé d'évoluer (introduction de nouvelles ressources) si la contradiction d'évolution ne peut être résolue avec les ressources disponibles existantes. Cette résolution passe par la possible modification des valeurs des paramètres des éléments de performance, guidée par celles du paramètre **X**.

Le prochain paragraphe est destiné à formaliser ces contradictions de manière à comprendre l'influence exercée par les paramètres X sur leur élément de performance respectif.

2.2.3.2) Description formelle

OTSM-TRIZ ne proposait, à notre connaissance, qu'une forme sémantique des contradictions. Une modélisation graphique, complétant la technique des contradictions, est proposée dans ce paragraphe.

Comme cela a déjà été évoqué concernant les compromis, un conflit ou une contradiction entre deux grandeurs définit implicitement l'existence d'une relation entre elles. Les schémas bloc ou les bond graph [Blundell 1982] sont des langages graphiques de modélisation qui s'y prêtent. Les bond graph s'appuient sur la caractérisation des phénomènes d'échanges de puissance au sein d'un système physique. Or le premier chapitre a montré que d'une part les flux d'énergie, d'informations ou de matériels et d'autre part, les aspects relevant des ressources humaines, devaient être considérés dans un système de production. Utiliser le formalisme des bond graph serait alors restrictif par rapport aux besoins identifiés dans les deux premiers chapitres. Les règles des schémas bloc, plus ouvertes, sont donc adoptées, pour éviter de telles restrictions.

Une formalisation, sous forme d'un schéma bloc, de ces interdépendances est proposée sur la figure (61). Tous les blocs ne sont pas renseignés, uniquement pour refléter la symétrie du diagramme et simplifier la représentation graphique.

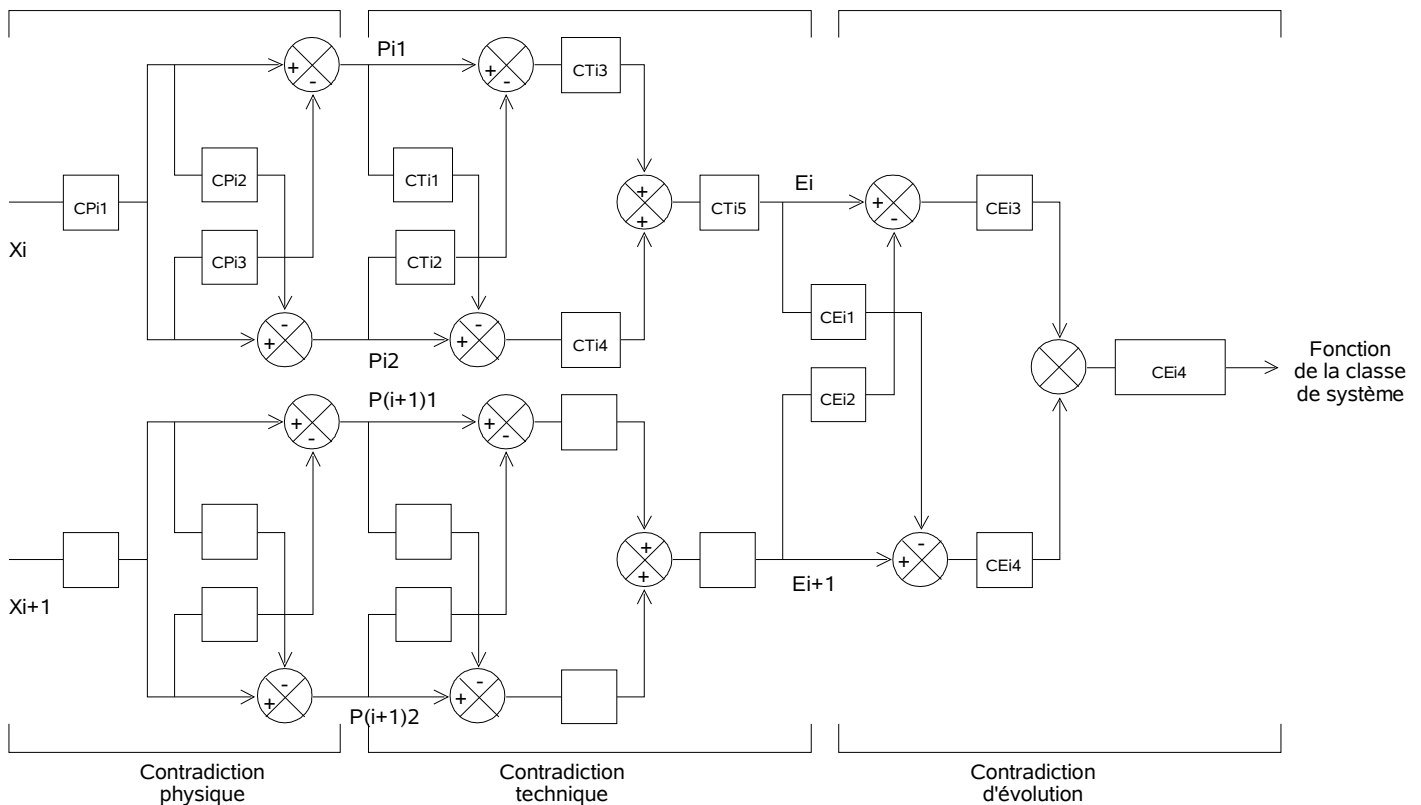


Figure 61 : Schéma bloc du modèle des contradictions d'OTSM-TRIZ

Ce modèle s'appuie sur les principes de la systémique adoptés jusqu'à présent pour la modélisation du système, principalement pour justifier la décomposition en

sous-systèmes. La complexité démontrée du système justifie l'approche « boîte noire » et l'observation d'intrants et d'extrants.

Toutes les expressions littérales des fonctions C_{pqr} , représentées sur la figure (61), sont a priori inconnues pour une classe de système, puisque le concepteur est confronté à un « problème ». Elles permettent néanmoins d'assurer la cohérence des comparaisons.

Ainsi, le respect d'une fonction est évalué par la comparaison de deux éléments de performance. Les choix de conception sont effectués sur les deux paramètres X_i et X_{i+1} . La fonction de transfert (2.2.3.2.iii) montre cette dépendance, et illustre l'aspect dialectique de la technique des contradictions.

$$P_{i1} = C_{Pi1} \cdot (1 - C_{Pi3}) \cdot X_i \quad (2.2.3.2.i)$$

$$P_{i2} = C_{Pi1} \cdot (1 - C_{Pi2}) \cdot X_i \quad (2.2.3.2.ii)$$

$$E_i = C_{Ti5} \cdot (C_{Ti3} - C_{Ti4} \cdot C_{Ti1}) \cdot P_{i1} + C_{Ti5} \cdot (C_{Ti4} - C_{Ti3} \cdot C_{Ti2}) \cdot P_{i2} \quad (2.2.3.2.iii)$$

Les paramètres P , à l'image du schéma bloc, ne sont que des variables internes du système. Le concepteur ne peut agir directement sur elles. Par contre, leur état permet de comprendre en profondeur le fonctionnement du système.

Dans la suite du développement, les simplifications graphiques des figures (62) et (63) sont retenues. Elles facilitent la lecture des modèles, sans laisser d'interprétation possible.

- Une contradiction entre deux grandeurs se représente par le symbole de la figure (62), (où l'équivalence avec le schéma bloc est rappelée).

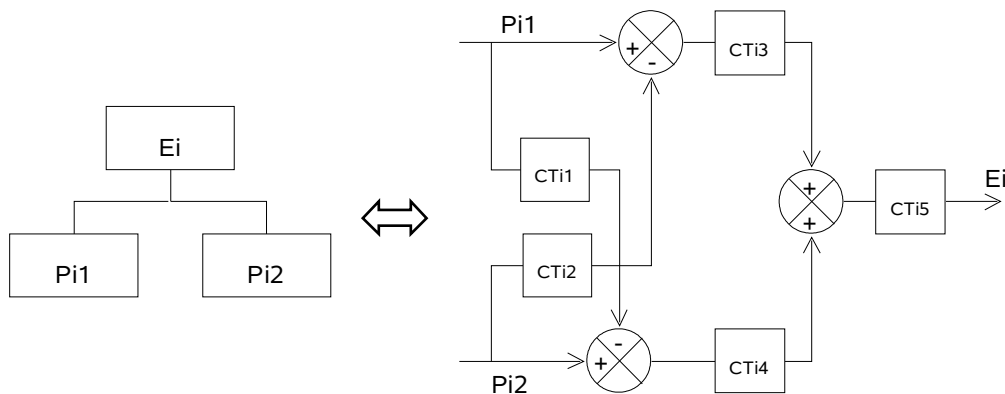


Figure 62 : Contradiction entre deux grandeurs

- Une contradiction entre les valeurs d'une même grandeur se représente par le symbole de la figure (63), (où l'équivalence avec le schéma bloc est rappelée).

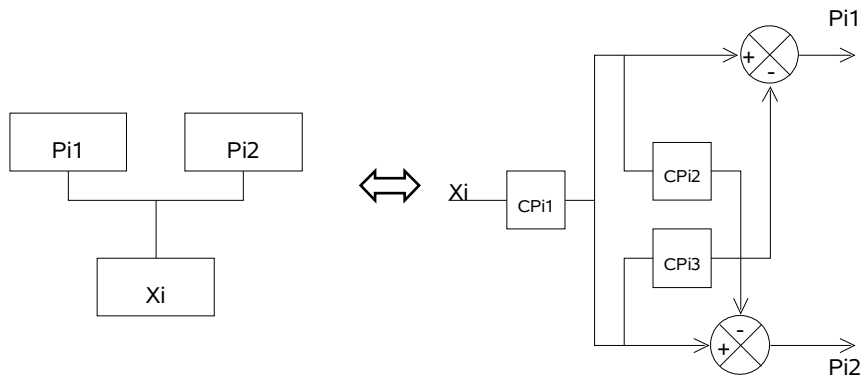


Figure 63 : Contradiction physique

En synthèse, l'application d'OTSM-TRIZ impose la définition de plusieurs concepts, pour aider le concepteur à dépasser la contradiction organisationnelle auquel il est confronté :

- La classe du système étudié ;
- Les fonctions du système étudié ;
- Les éléments de performance caractérisant ces fonctions ;
- Les paramètres (paramètres P et X) de ces éléments de performance.

3) Construction du modèle de problèmes

Après avoir défini le cadre théorique d'OTSM-TRIZ, son application aux systèmes de production usinants est développée. L'objectif est ainsi de formaliser les contradictions d'évolution, techniques et physiques pour les trois problèmes fondamentaux que les concepteurs doivent résoudre.

3.1) Problèmes et connaissances en UGV

Comme cela a été formulé dans le cadre des objectifs stratégiques, GRAI permet de mettre en évidence trois classes de centre de décision assurant la définition et l'application des objectifs stratégiques du système de production. Ils sont liés aux trois fonctions du système décisionnel : « Gérer les Produits », « Gérer les Ressources » et « Planifier » qui assure la synchronisation et la coordination de cet ensemble.

Les deux modes identifiés se formulent ainsi :

- **Mode 1 : Exploiter les impacts de l'Usinage Grande Vitesse pour améliorer des critères stratégiques, sans dégrader les résultats économiques des ventes des produits**
- **Mode 2 : Améliorer les résultats des ventes des produits par l'implémentation de l'UGV et en valoriser ensuite la maîtrise technologique dans le secteur industriel.**

L'interprétation du schéma d'OTSM-TRIZ pour ces deux modes (cf. figures (41) et (42), p.86) doit mettre en évidence les Demandes et les Explications des Demandes au cœur des contradictions organisationnelles, pour les concepteurs du système. Ils participent à l'évolution du système sur les horizons opérationnel, organisationnel et stratégique.

Dans un soucis de concision, nous proposons de confondre les concepteurs du système avec les centres de décision, de l'approche GRAI. Le problème considéré étant « le système doit-il évoluer vers l'UGV », les situations des neuf centres décisionnels peuvent ainsi être exprimées sous la forme des trois contradictions organisationnelles, développées dans ce paragraphe.

Tout d'abord, selon [Cochran 2000], la fonction principale d'un système de production est de « Maximiser le retour sur investissement de l'entreprise à long terme ». Les trois centres décisionnels de la fonction « Planifier » ont pour finalité de coordonner les autres centres décisionnels pour respecter cette demande, et ainsi contribuer à assurer la pérennité de l'entreprise. En analysant les exigences fonctionnelles fondamentales présentées par Cochran, la première contradiction organisationnelle se formule de la sorte :

Chaque centre décisionnel de la fonction « Planifier » { ELEMENT CENTRAL P }

- < doit s'appuyer sur les prévisions de commande et le coût de ses ressources > { DEMANDE 5 } pour < résoudre les problèmes de retour sur investissement (et être amené à évoluer son système de production) > {EXPLICATION de la DEMANDE 5}.

MAIS ce décideur { ELEMENT CENTRAL P }

- < ne connaît pas le secteur industriel (clients, fournisseurs, concurrents, institutions) futur > { DEMANDE 6 } parce que < les autres fonctions de l'entreprise ne le lui ont pas appris > { EXPLICATION de la DEMANDE 6 }.

Ces besoins « économiques » se traduisent par deux finalités concernant les extrants du système (les produits finis) et les intrants du système (les ressources).

Chaque centre décisionnel de la fonction « Gérer les Produits » { ELEMENT CENTRAL GP }

- < doit connaître la capacité et la diversité des ressources actuelles > { DEMANDE 3 } pour < résoudre les problèmes dans la gestion des produits (et être amené à faire évoluer sa partie du système de production) > { EXPLICATION de la DEMANDE 3 }.

MAIS ce centre de décision { ELEMENT CENTRAL GP }

- < ne connaît pas les ressources futures > { DEMANDE 4 } parce que < les autres centres décisionnels ne le lui ont pas appris > { EXPLICATION de la DEMANDE 4 }.

Chaque centre décisionnel de la fonction « Gérer les Ressources » { ELEMENT CENTRAL GR }

- < doit connaître la diversité et la qualité exigée des produits > { DEMANDE 1 } < pour résoudre les problèmes dans la gestion des ressources (et être amené à faire évoluer sa partie du système de production) > { EXPLICATION de la DEMANDE 1 }.

MAIS ce centre de décision { ELEMENT CENTRAL GR }

- < ne connaît pas les produits futurs (en qualité et diversité) > { DEMANDE 2 } parce que < les autres centres décisionnels ne le lui ont pas appris > { EXPLICATION de la DEMANDE 2 }.

La première catégorie de problèmes potentiels est ainsi issue de la nécessité pour une entreprise, de devoir fabriquer des produits à un certain niveau de QUALITE pour satisfaire ses clients. La méconnaissance des possibilités des technologies provoque une situation de blocage devant ces éventuels problèmes. La seconde catégorie de problèmes potentiels est issue de la nécessité pour une entreprise de devoir fabriquer une certaine DIVERSITE de produits.

3.2) Description des problèmes

Le but de cette étape de la construction du modèle est de comprendre le fonctionnement du système complexe et de mettre en évidence les interactions multiples au sein de celui-ci. Notre étude porte sur les interactions entre des problèmes apparaissant entre le système physique et les choix à faire à différents niveaux du système décisionnel.

Sur la base du Modèle des Systèmes Opérationnels de Production et de son développement suivant le cycle de vie du système, l'analyse des inducteurs de coût, présentée dans la deuxième partie, nous devons établir :

- Les fonctions de la classe du système,
- Les couples d'éléments performance en contradiction, évaluant l'accomplissement de chacune des fonctions.

Pour ce premier sous-ensemble de caractéristiques du système de production, nous avons déterminé les inconnues (fonctions et performances) par une approche déductive. Les connaissances générales des domaines de la modélisation des systèmes de production et de l'usinage par enlèvement de matière, dont l'état de l'art a été exposé au chapitre Un, nous fournissent les fondements théoriques des raisonnements déductifs. Ce processus aboutit à un modèle générique, valable pour tous les niveaux du système.

Nous avons ainsi choisi une présentation séquentielle au cours du prochain paragraphe 3.2.1. La décomposition respective de chaque fonction y est détaillée de façon indépendante.

- La finalisation du modèle de problèmes nécessite ensuite l'identification des paramètres de conception (paramètres P et X) du système, pour chaque élément de performance. Ces paramètres sont les explications des causes de l'apparition du problème particulier sous forme de contradiction d'évolution. La compréhension des causes d'apparition donne de ce fait des pistes pour la construction des architectures cible du système.

Pour exprimer les composants de ce deuxième sous-ensemble, nous nous sommes rendus compte qu'une approche déductive était impossible. En effet, une telle approche reviendrait à relier les connaissances générales du domaine à des déclinaisons des concepts de générique. Aucune étude de ce type n'a été recensée. Le seul schéma commun à l'identification de tous les composants est la recherche dans la connaissance générale de grandeurs en contradiction (au sens d'OTSM-TRIZ).

Dans ce cadre, les contradictions du système (techniques et physiques) ne sont pas non plus présentées suivant un cheminement déductif. Il nous aurait semblé artificiel de le faire.

3.2.1) Performances du système de production

OTSM-TRIZ place la performance comme élément de mesure de l'accomplissement d'une fonction d'un système. La définition des éléments de performance est donc indispensable pour comprendre l'évolution d'un système. Dans le domaine économique, des indicateurs de performance ont déjà été présentés lors du chapitre Deux.

Ce paragraphe a pour but de préciser quels indicateurs de performance ont été reliés à des fonctions d'un système, et de proposer des définitions complémentaires.

3.2.1.1) Contexte

[Tomala 2002] montre que « la variété des usages du terme « performance », fait que celui-ci est très rarement explicitement défini, même dans des ouvrages dont il représente l'objet d'étude central ». Dans le contexte industriel, [Lorino 1998] propose néanmoins la définition suivante : « est performance dans l'entreprise tout ce qui, et seulement ce qui, contribue à atteindre les objectifs stratégiques ».

Cette définition peut être élargie, en la croisant avec l'analyse de cohérence proposée par [Ducq 2001]. Quelle que soit la vue du process (opérationnel, organisationnel ou stratégique), plus une entreprise satisfait ses objectifs, à condition que ceux-ci permettent la pérennisation de l'entreprise, plus elle est performante.

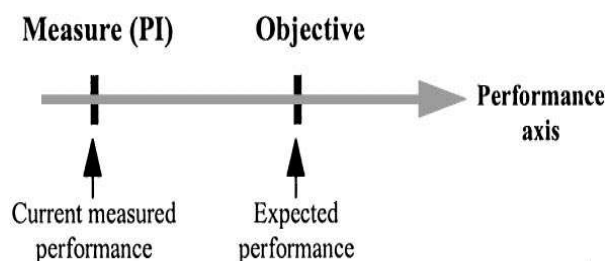


Figure 64 : Objectifs de performance et performance mesurée
[Ducq 2001]

Le système décisionnel fixe des objectifs de performance au niveau stratégique. Ils sont ensuite décomposés et déclinés jusqu'au niveau opérationnel. Parmi l'ensemble des indicateurs de performance, ceux étant couplés par une relation de type contradiction sont ceux que nous cherchons à identifier, pour chaque fonction du système physique. Cette restriction se justifie par le choix du modèle de référence d'OTSM-TRIZ.

Par contre, dans un cas général, le modèle des contradictions s'appuie sur l'hypothèse qu'il n'existe que deux variables agissant sur les valeurs de deux éléments de performance respectifs. Les couplages entre les déclinaisons d'une même variable pour chacun des quatre niveaux du modèle du système de production et les couplages entre les deux variables d'une même fonction ne sont pas formalisés. L'existence d'au moins une autre variable ne peut être démontrée, mais ne peut pas non plus être écartée. Cela constitue une limite acceptée de cette approche dialectique.

3.2.1.2) Contradictions d'évolution du système

Après avoir défini le système et ses fonctions dans la première partie de ce chapitre, ce paragraphe a pour objectif de formaliser les éléments de performance permettant d'évaluer comment une fonction du système est assurée. Tous les éléments de performance évoqués dans ce paragraphe sont des valeurs mesurables. Les valeurs objectifs de performances ne peuvent être en contradictions, puisqu'elles sont fixées par des centres décisionnels. Elles sont de l'ordre du prévisionnel.

Une fois que le système prend une forme matérielle, ses caractéristiques font que des performances relatives à ses fonctions sont en contradiction, d'après OTSM-TRIZ. Seules des valeurs réelles mesurables sont donc en contradiction pour une fonction d'un système.

Dans [Geiskopf 2004a] et [Geiskopf 2004b], l'approche initiale, adoptée pour identifier les performances, est présentée. Elle s'appuie sur une AMDEC produit du système de production. Les Modes de défaillance doivent faire apparaître les difficultés de la fonction. Les Effets des défaillances sont les impacts sur le système, mettant en évidence les éléments de performances de la fonction. Ils sont exprimés pour une détection à un niveau donné (N1, 2, 3, 4) du MSOP. Les Causes des défaillances sont l'explication technique de l'apparition de la défaillance. La Détection des défaillances renvoie à l'événement déclencheur ou à la performance suivie. Enfin, le Remède aux défaillances propose de nouvelles caractéristiques ou paramètres de la fonction. Son niveau de détail rend son application fastidieuse à des systèmes particuliers.

Les vues systémiques de produit-ressource autorisent néanmoins, d'exprimer de manière générique les contradictions pour chacun des niveaux du système. Leur instanciation aux quatre niveaux est présentée sous forme de tableaux, pour chaque élément de performance.

a) Assurer le Retour sur investissement à long terme

Dans [Goldratt 1990], le retour sur investissement (*ROI*) se mesure par la relation (3.2.1.2.i).

$$ROI = \frac{(Throughput - Operating\ expenses)}{Inventory} \quad (3.2.1.2.i)$$

Pour rappel, les trois paramètres du *ROI* se définissent ainsi :

- THROUGHPUT : rythme avec lequel le système génère de l'argent par les ventes. Il s'obtient par la différence entre le revenu des ventes et le coût « matière » des produits vendus (noté *inventory(raw material)*).

- INVENTORY (le niveau des STOCKS) : argent que le système a investi pour acheter des objets qu'il a l'intention de vendre ;
- OPERATING EXPENSES (dépenses de FONCTIONNEMENT) : argent que le système dépense pour transformer les stocks en throughput.

Le *ROI* , également traduit par le taux de rentabilité de l'investissement, correspond au rapport entre le résultat net après impôt et le montant des capitaux investis [Martinet 2003]. Cette grandeur adimensionnelle ne doit pas être confondue avec le Temps de Retour sur Investissement, qui est la durée au bout de laquelle le *ROI* devient supérieur ou égal à Un.

La définition du Retour sur Investissement ne peut être exploitée telle quelle pour identifier les éléments de performance. En effet, selon le schéma d'OTSM-TRIZ, une contradiction d'évolution ne nécessite qu'un seul couple de grandeurs et non pas un triplet. La notion de « résultat d'exploitation » (RE), comme différence entre le produit d'une vente (PV) et le coût de revient (CR) correspondant, s'y prête plus (du point de vue couple de grandeurs du moins).

$$RE = PV - CR \quad (3.2.1.2.ii)$$

$$CR = Inventory + Operating\ expenses \quad (3.2.1.2.iii)$$

$$PV = Throughput + inventory\ (raw\ material) \quad (3.2.1.2.iv)$$

Les relations (3.2.1.2.ii à iv)) montrent les liaisons entre les grandeurs comprises dans la détermination du Retour Sur Investissement, et celles comprises dans le Résultat d'exploitation.

C'est pourquoi, nous proposons de mesurer le respect de la fonction « assurer un retour sur investissement à long terme » par les deux éléments de performance Inflows et les Outflows (correspondant respectivement à *PV* et *CR*). Ces deux éléments se définissent ainsi :

• **INFLOWS (E1)**

Part du chiffre d'affaires générée par la valeur des produits de chaque niveau.

• **OUTFLOWS (E2)**

Dépenses cumulées induites par la mise en condition, la maintenance et l'exploitation des ressources, pour obtenir les produits d'un niveau donné. Elles représentent le coût total du cycle de vie de la ressource.

Le détail des inducteurs de coût (modélisant la décomposition des Outflows) a été présenté lors du chapitre Deux, pour la structure générique, et en annexes pour l'instanciation niveau par niveau.

Si le résultat d'exploitation (différence entre les Inflows et les Outflows) n'est pas conforme aux objectifs prévisionnels assurant un retour sur investissement à long terme donné, le système est obligé d'évoluer. Seules deux manières s'offrent à

lui (suivant une approche économique) : soit diminuer ses dépenses (Outflows), soit augmenter ses revenus (Inflows).

Seulement, sans évolution du système opérationnel,

- une diminution des dépenses entraîne une diminution des rentrées ;
- une augmentation des rentrées sans augmentation des dépenses n'est pas possible.

Les deux éléments E1 et E2 sont donc contradictoires. Ils guident l'évolution du système. Le respect simultané des deux éléments nécessite l'évolution du système, si un problème d'Inflows ou/et d'Outflows apparaît. Le tableau 7 formalise leur déclinaison pour les différents niveaux du modèle des systèmes opérationnels.

Niveau	Élément 1	Élément 2
1	Part du chiffre d'affaires due aux copeaux générés.	Dépenses cumulées induites par la mise en œuvre et l'exploitation d'une arête de coupe.
2	Part du chiffre d'affaires due aux surfaces générées.	Dépenses cumulées induites par la mise en œuvre et l'exploitation d'un porte-outil.
3	Part du chiffre d'affaires due aux pièces générées.	Dépenses cumulées induites par la mise en œuvre et l'exploitation d'un montage d'usinage.
4	Part du chiffre d'affaires due aux lots générés.	Dépenses cumulées induites par la mise en œuvre et l'exploitation d'une machine.

Tableau 7 : Déclinaison des éléments de performance E1 et E2

La complexité de l'évaluation des coûts a été déjà démontrée précédemment. Le tableau 7 met de plus en évidence la complexité de dégager l'influence d'un produit sur le chiffre d'affaires. Dans le prix d'un lot de fabrication qu'accepte de payer un client, cela reviendrait à pouvoir quantifier, par exemple, la somme qu'il estime pouvoir consacrer au matériau utilisé...

L'approche économique ne peut donc suffire, même en l'abordant par les contradictions. Cela justifie également la décomposition des deux autres fonctions.

b) Faire des Produits de Qualité

Au chapitre Un, les critères de qualité directement concernés par les processus d'usinage ont été dégagés. Il s'agit de :

• DELAI DE FABRICATION D'UN PRODUIT (E3)

Intervalle de temps compris entre l'obtention d'un produit k et celle du produit k+1, pour un niveau donné du système.

• PRECISION D'UN PRODUIT (E4)

Conformité « technique » au stade de livraison.

La description niveau par niveau des grandeurs quantitatives associées a été également proposée au chapitre Un (cf. tableaux 2 et 3).

Si dans un système, un produit n'est pas à la précision demandée par le cahier des charges (son dessin de définition), ses délais de fabrication ne pourront pas être respectés sans faire évoluer le système. L'augmentation du temps de fabrication est due à la nécessité de :

- Mettre en conditions les ressources sans défaillances : une préparation plus précise (mise en cohérence spatiale des différentes ressources), un contrôle plus exhaustif des spécifications, une maintenance accrue des équipements...
- Utiliser les ressources dans des conditions inférieures que celles pour lesquelles elles sont initialement prévues (par exemple pour limiter les efforts de coupe, pour faciliter leur surveillance...).

Inversement, si un produit est réalisé avec un retard par rapport à la date prévue avec le client, la diminution du délai de fabrication exigée ne peut s'obtenir sans une dégradation de la précision, si le système n'évolue pas.

Les deux éléments de performance sont donc contradictoires. Le respect simultané des deux éléments nécessite l'évolution du système, si un problème de précision ou/et de délai apparaît.

c) Faire une Diversité de produits

Au cours du chapitre Un, il a été démontré la nécessité de flexibilité des systèmes de production, afin de satisfaire ses clients sur les points :

- Diversité de produits dans un secteur industriel donné ;
- Imprévisibilité de la demande et exigence de réactivité de la réponse à cette demande.

Le concepteur du système de production doit choisir des ressources et une organisation qui lui permettent d'assurer la qualité et la diversité de produits exigées. Il a également été relevé le manque de formalisme des grandeurs permettant de mesurer la flexibilité du système ou d'une ressource du système.

Celle-ci peut s'envisager comme l'aptitude de la ressource d'effectuer différents processus efficacement et économiquement. Aussi, nous proposons d'introduire deux éléments de performance qui permettent de quantifier cette aptitude.

La flexibilité et la réactivité d'une ressource du système de production se définissent ainsi :

• Flexibilité (E5)

Elle est notée F_i . C'est le nombre de produits différents (noté N_{ki}) par ressource par unité de temps. (L'indice i correspond à un niveau du modèle des systèmes opérationnels).

• Réactivité (E6)

R_i : Proportion allouée (pendant cette unité de temps) à la mise en condition de toutes les ressources du niveau i.

Soit T_i le temps total d'obtention (durée d'exécution des activités du niveau i) des N_i produits. Ce temps n'inclut pas les temps d'attente dans les stocks.

$$T_i = \sum_{j=1}^{j=N_{ki}} (Tmc_{ij} + Tu_{ij}) \quad (3.2.1.2.v)$$

Où Tmc_{ij} est le temps de mise en œuvre de la ressource j et Tu_{ij} est le temps d'utilisation de la ressource j du niveau i, pour les activités de transformations de produits. Les activités à effectuer pour la mise en condition d'une ressource ont été détaillées dans le chapitre Deux et figurent en annexe, décrites niveau par niveau.

La flexibilité se définit suivant la formule (3.2.1.2ii)

$$F_i = \frac{N_{ki}}{T_i} \quad (3.2.1.2.vi)$$

La réactivité se définit suivant la formule (3.2.1.2.iii)

$$R_i = \frac{Tmc_i}{T_i} \quad (3.2.1.2.vii)$$

Dans la formule ((3.2.1.2.iv)), Tmc_i se définit par :

$$Tmc_i = \sum_{j=1}^{j=N_{ki}} (Tmc_{ij}) \quad (3.2.1.2.viii)$$

Des relations (3.2.1.2.ii), (3.2.1.2.iii), (3.2.1.2.iv), il vient :

$$\frac{F_i}{R_i} = \frac{\sum_{j=1}^{j=N_{ki}} Tmo_{ij}}{N_{ki}} \quad (3.2.1.2.ix)$$

Or $\sum_{j=1}^{j=N_{ki}} Tmc_{ij} = N_{ki} \cdot \overline{Tmc_i}$, où $\overline{Tmc_i}$ est le temps moyen de mise en condition des ressources du niveau i.

Le rapport de la Flexibilité et de la Réactivité, avec les définitions proposées, est donc constant.

$$\frac{F_i}{R_i} = \frac{1}{\overline{Tmc_i}} \quad (3.2.1.2.x)$$

En cherchant à augmenter la flexibilité, la réactivité se trouve elle aussi augmentée. Inversement, en voulant diminuer la réactivité la flexibilité l'est aussi. Avec cette définition, les deux performances sont contradictoires.

Comme le montre la déclinaison effectuée dans le tableau 8, cette définition de la flexibilité permet de décrire toutes les formes de flexibilité externe rencontrées dans la littérature :

- flexibilité des machines pour satisfaire la flexibilité de volume (au niveau 4),
- flexibilité des montages d'usinage pour satisfaire la flexibilité de variantes (au niveau 3),

Niveau	Élément 5	Élément 6
1	Nombre de matériaux différents par arête de coupe et par unité de temps.	Pourcentage de la durée de mise en œuvre de l'arête de coupe.
2	Nombre de surfaces différentes par porte-outil et par unité de temps.	Pourcentage de la durée de mise en œuvre du porte-outil.
3	Nombre de pièces différentes par montage d'usinage et par unité de temps.	Pourcentage de la durée de mise en œuvre du montage d'usinage
4	Nombre de lots de fabrication différents par machine et par unité de temps.	Pourcentage de la durée de mise en œuvre de la machine

Tableau 8 : Déclinaison de E5 et E6

Le respect simultané des deux éléments nécessite l'évolution du système, si un problème de flexibilité ou/et de réactivité apparaît.

3.2.2) Contradictions du système

Les trois fonctions fondamentales introduites dans le paragraphe précédent formalisent les finalités du système de production :

- Assurer un Retour sur Investissement à long terme ;
- Faire des produits de qualité ;
- Faire une diversité de produits.

Le processus de conception d'un système de production de [Cochran 2000] (le « Production System Design ») montre l'approche classique permettant de satisfaire les besoins ainsi exprimés. La figure (65) la synthétise. Les attributs du client (CA) sont traduits en termes de besoins fonctionnels (FR) et contraintes (C). Ces besoins représentent les objectifs à remplir par le processus de conception, et les paramètres de conception (DP) le moyen de les satisfaire. Les solutions ainsi exprimées permettent de fixer les variables du système (SV) et des processus (PV).

OTSM-TRIZ introduit dans ce schéma, la notion de performance. Les éléments de performance font le lien entre les fonctions attendues du système, par les contradictions d'évolution, et les paramètres de conception par les contradictions techniques. Le lien entre les paramètres de conception et les variables du système est modélisé par les contradictions physiques.

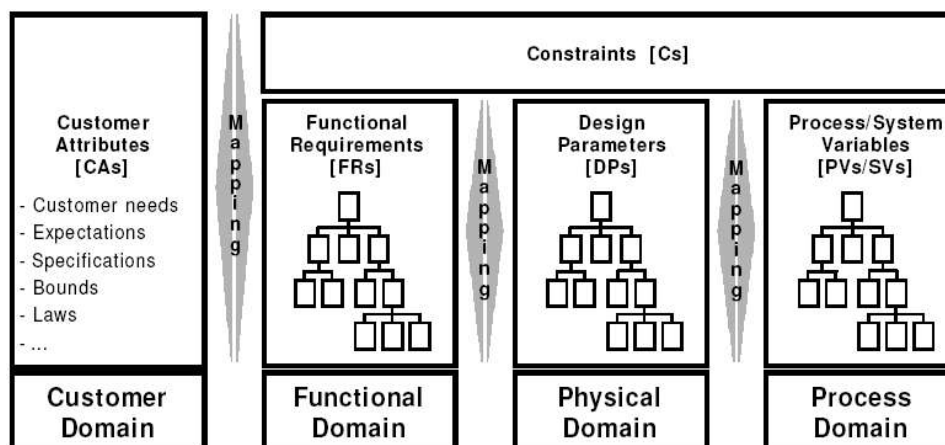


Figure 65 : Décomposition d'un processus de conception du PSD [Cochran 2000]

Ces trois types de liens ont été formalisés sous forme de schéma bloc au paragraphe 2.2.3.2. Les « Design Parameters » ont pour équivalent les paramètres P_{ij} et les « system variables », les paramètres X_i . Aussi dans la suite, les termes « variable » et « paramètre X_i » seront considérés comme équivalents, et utilisés indifféremment.

La transposition directe du PSD n'est pas possible, du fait du regroupement par élément de performance. OTSM-TRIZ impose une description fonctionnelle limitée aux fonctions représentant les finalités du système de production. Nous avons, par ce schéma, identifié trois fonctions de référence.

Ce paragraphe a pour but de présenter la décomposition des éléments de performance en paramètres de conception, et variables du système, déduites de la technique des contradictions. L'identification du Paramètre X associé (une variable du système), va permettre de dépasser le compromis (au sens optimisation des performances) et de résoudre cette contradiction technique.

Le raisonnement suivant a été appliqué à chacun des éléments de performance, pour en identifier les paramètres de conception contradictoires. Pour améliorer un élément de performance donné (suite à l'apparition d'un problème), les valeurs de deux paramètres doivent être simultanément améliorées. Or, à toutes choses égales par ailleurs, améliorer l'un conduit à dégrader l'autre. Cette proposition renforce notre opinion que l'approche déductive pure n'est pas possible, dans la construction des contradictions techniques et physiques. Le triplet formé des P_{i1} , P_{i2} et X_i ne peut se déduire de façon hiérarchique et séquentielle de la connaissance générale.

Nous avons choisi, pour chaque fonction fondamentale du système de production, de suivre la structure de présentation suivante :

- Présentation de la figure générique des deux éléments de performances, des paramètres et variables, en utilisant le graphisme déduit des schémas bloc.
- Définitions génériques des deux paramètres de l'élément de performance considéré.
- Déclinaison de ces paramètres aux quatre niveaux du système, sous forme d'un tableau.
- Illustration de la contradiction technique entre ces deux paramètres.

- Définition générique du paramètre Xi (ou variable) associé à un couple de paramètres.
- Formulation de la contradiction physique.
- Déclinaison de cette variable aux quatre niveaux du système, sous forme d'un tableau.

3.2.3) Assurer le Retour sur investissement à long Terme

3.2.3.1) Représentation graphique

La figure (66) présente la décomposition complète de la finalité économique du système de production : « assurer un Retour sur Investissement à long terme. »

Le graphisme simplifié est utilisé à la place des règles du schéma bloc.

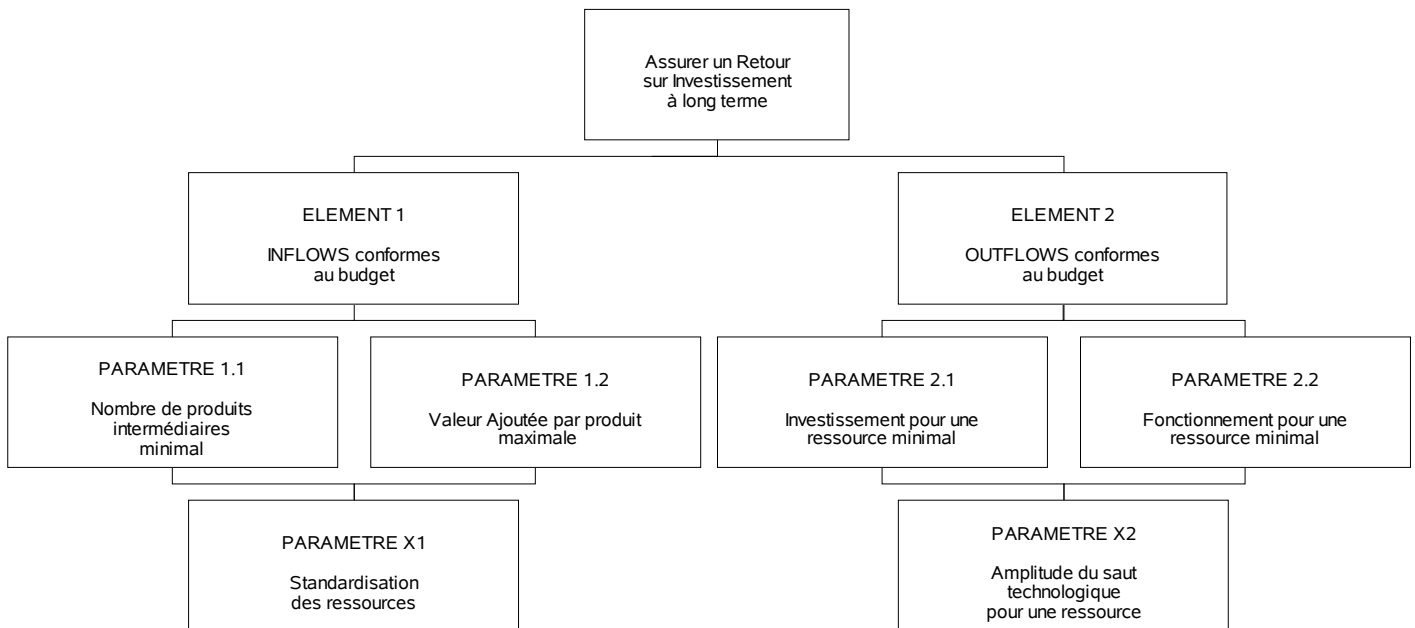


Figure 66 : Contradictions de la fonction « assurer un Retour sur Investissement à long terme »

3.2.3.2) Décomposition de l'élément Inflows

a) Définition des paramètres

- **Paramètre 1.1** : Nombre de produits intermédiaires

Définition : quantité de produits intermédiaires distincts du niveau i pour un produit final (extrant du système) du niveau $(i+1)$. Dans le cas où $i=4$, l'extrait du niveau 5 représente l'ensemble de la production du système.

- **Paramètre 1.2** : Valeur ajoutée par produit

Définition : différence entre la part du Chiffre d'Affaires due à la vente d'un produit fini du niveau i et les achats à des tiers pour le faire.

b) Déclinaison des paramètres 1.1 et 1.2

Le tableau 9 présente pour l'élément de performance « INFLOWS » la déclinaison des paramètres aux quatre niveaux du système.

Niveau	Paramètre 1.1	Paramètre 1.2
1	Volume de copeaux à enlever par surface du dessin de définition.	Différence entre la part du Chiffre d'Affaires due au volume de copeaux et les achats à des tiers pour le faire.
2	Aire totale (y compris les surfaces intermédiaires) à parcourir pour obtenir la géométrie finale.	Différence entre la part du Chiffre d'Affaires due à l'aire de chaque surface usinée sur le produit fini et les achats à des tiers pour la faire.
3	Nombre de pièces (en temps qu'états intermédiaires) à réaliser pour obtenir le lot final.	Différence entre la part du Chiffre d'Affaires due à une pièce d'un lot final et les achats à des tiers pour la faire.
4	Nombre de lots (en temps qu'état intermédiaire) pour la production de l'atelier.	Différence entre la part du Chiffre d'Affaires due à un lot vendu et les achats à des tiers pour le faire.

Tableau 9 : Déclinaison des paramètres de l'élément INFLOWS

c) Illustration de la Contradiction technique

Pour un atelier d'usinage, les Inflows sont directement reliés aux extrants du système. L'intérêt pour l'industriel est de maximiser sa charge en fonction de sa capacité. Mais, à charge donnée (souhaitée maximale et équilibrée), pour un niveau donné, l'industriel doit chercher à minimiser le nombre d'états intermédiaires (au sens du Modèle des Systèmes Opérationnels de Production) nécessaires du niveau directement inférieur. En effet, ces produits intermédiaires ne sont pas des extrants du système. Ils ne génèrent pas directement d'Inflows.

La charge se traduit par le nombre de commandes à honorer, ceci au niveau « 5 ». Elle peut être interprétée comme étant également le nombre de pièces à faire dans un lot (niveau 3), la surface totale à parcourir par pièce, ou le volume de matière à obtenir. Minimiser le paramètre 1.1 revient à minimiser tous les produits « internes » au système de production, non commandés directement par le client.

Inversement, la valeur ajoutée par produit doit être maximisée. Cela revient à chercher à diminuer le coût des achats réalisés avec des tiers (toute entité extérieure au système de production).

d) Définition du paramètre X1

- **Paramètre X1** : niveau de standardisation des ressources (bruts et équipements d'usinage).

La standardisation se définit par une « action ayant pour objet de définir collectivement, en fonction d'un besoin donné, une gamme de produits ou de méthodes aptes à satisfaire ce besoin dans les meilleures conditions » [Martinet 2003].

Nous proposons de définir, sur cette base, le niveau de standardisation par la taille de la collectivité concernée par cette action commune sur les ressources, par rapport à la taille du système de production. Un faible niveau de standardisation correspond à une ressource conçue et exploitée uniquement par le système de production particulier. Dans ce cas, la ressource est qualifiée de « ressource particularisée ». Un niveau de standardisation élevé correspond à une ressource conçue et développée sur le plan international (norme ISO par exemple). Dans ce cas, la ressource est qualifiée de « ressource standardisée ».

e) **Contradiction physique**

La contradiction physique s'énonce alors de la façon suivante :

Le niveau de standardisation des ressources doit être faible car la quantité de produits intermédiaires doit être minimisée, et élevé à la fois car la valeur ajoutée doit être maximisée aussi.

En particularisant une ressource, il est possible de concevoir une ressource répondant directement aux besoins particuliers de l'industriel. Pour un même produit final (extrait du système), le nombre d'étapes de l'environnement temporel peut ainsi être réduit. Inversement, en standardisant les ressources, le coût d'achat à un tiers est diminué et pour un même produit, la valeur ajoutée est augmentée, par définition.

f) **Déclinaison de la contradiction physique**

La contradiction physique se décline, suivant les quatre niveaux du système, comme détaillé dans le tableau 10.

Niveau	Paramètre X1
1	Les arête de coupe, lubrifiant et matériaux doivent être particularisés pour diminuer le nombre de copeaux nécessaires à l'enlèvement d'un volume de matière, et simultanément standardisés car la valeur ajoutée doit être maximisée aussi.
2	Les porte-outil et surépaisseur d'usinage doivent être particularisés pour diminuer le nombre d'opérations nécessaires à l'obtention de l'entité d'usinage, et simultanément standardisés car la valeur ajoutée doit être maximisée aussi.
3	Les montage d'usinage et géométrie de brut doivent être particularisés pour diminuer le nombre de sous-phases nécessaires à l'obtention d'un lot de fabrication, et simultanément standardisés car la valeur ajoutée doit être maximisée aussi.
4	Les machine et la taille des lots de bruts doivent être particularisés pour diminuer le nombre de phases nécessaires à l'obtention de toute la production du système, et simultanément standardisés car la valeur ajoutée doit être maximisée aussi

Tableau 10 : Déclinaison du paramètre X1

La particularisation (ou la standardisation) des ressources est donc une variable fondamentale guidant les choix de conception des ressources (au sens équipements de production ou pièces brut).

3.2.3.3) Décomposition de l'élément Outflows

a) Définition des paramètres

Les Outflows représentent les dépenses dues aux ressources pendant le cycle de vie des ressources. Deux catégories de dépenses ont été dégagées : les investissements et le fonctionnement. Dans ce raisonnement, les coûts induits par le démantèlement suivent la même évolution que les coûts de fonctionnement. Cette contradiction est justifiée par le modèle de [Woodward 1997].

- **Paramètre 2.1** : investissements cumulés en ressources

Définition : fonds engagés durant la phase d'implémentation des ressources. Ils incluent le prix d'achat des équipements d'usinage et de mise en condition, des infrastructures, de la formation des ressources humaines et le coût de la matière première. Le chapitre deux a détaillé ces aspects en les intégrant au cycle de vie du système de production.

- **Paramètre 2.2** : coûts de fonctionnement cumulés en ressources

Définition : fonds engagés durant la phase de production stabilisée des ressources. Comme pour le paramètre 2.1, ces aspects ont été détaillés au chapitre Deux, en les intégrant au cycle de vie du système de production.

b) Déclinaison des paramètres 2.1 et 2.2

Le tableau 11 présente, pour l'élément de performance, « OUTFLOWS » la déclinaison des paramètres aux quatre niveaux du système.

Niveau	Paramètre 2.1	Paramètre 2.2
1	Coûts cumulés d'Investissements dus à la mise en condition et à l'exploitation des arêtes de coupe.	Coûts de Fonctionnement cumulés dus à la mise en condition et à l'exploitation des arêtes de coupe.
2	Coûts d'Investissements cumulés dus à la mise en condition et à l'exploitation des porte-outils.	Coûts de Fonctionnement cumulés dus à la mise en condition et à l'exploitation des porte-outils.
3	Coûts d'Investissements cumulés dus à la mise en condition et à l'exploitation des montages d'usinage	Coûts de Fonctionnement cumulés dus à la mise en condition et à l'exploitation des montages d'usinage.
4	Coûts d'Investissements cumulés dus à la mise en condition et à l'exploitation des machines.	Coûts de Fonctionnement cumulés dus à la mise en condition et à l'exploitation des machines.

Tableau 11 : Déclinaison des paramètres de l'élément OUTFLOWS

c) Illustration de la contradiction technique

La contradiction technique à l'origine de cette contradiction physique est la seule qui ait été recensée directement dans la littérature. Elle est formalisée sous la forme de trois courbes par [Woodward 1997] sur la figure (67). « une augmentation des dépenses en capital initial (courbe A) provoque une plus grande disponibilité des équipements et des coûts de maintenance réduits, mesurés sur la courbe B. Au minimum du coût total (courbe C), est déduit le coût optimal du cycle de vie dû à la propriété de l'équipement. A l'inverse, un faible investissement peut entraîner un coût du cycle de vie très élevé ».

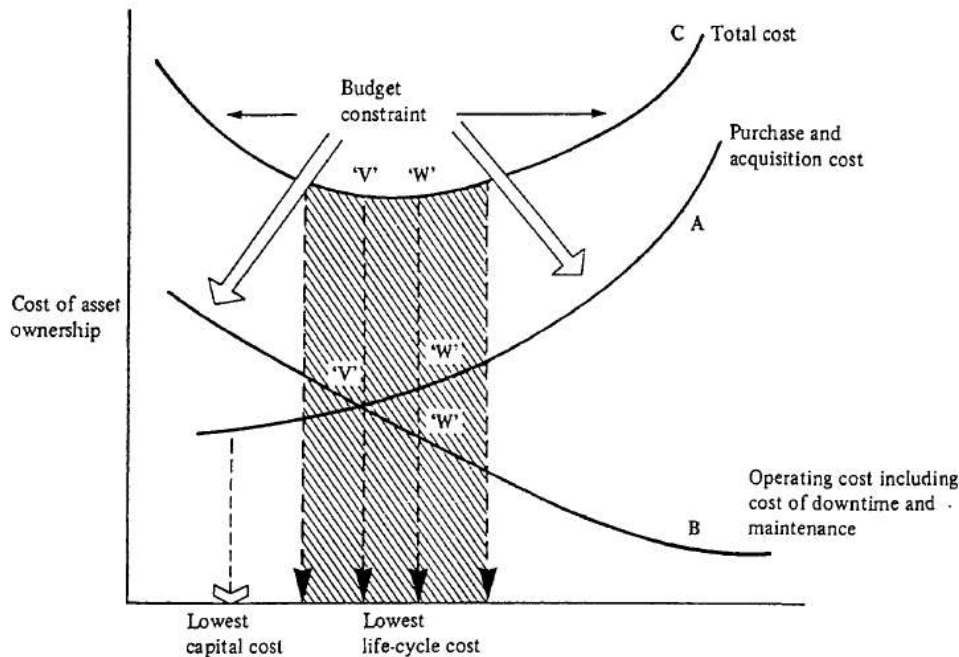


Figure 67 : Contradiction dans la possession d'un équipement [Woodward 1997]

d) Définition du paramètre X2

- **Paramètre X2** : amplitude du saut technologique des ressources.

Cette même figure montre que des contraintes budgétaires restreignent habituellement le champs des solutions possibles, en limitant soit les coûts initiaux, soit les coûts de fonctionnement ou le budget total. [Woodward 1997] conseille de résoudre cette contradiction en finançant la Recherche et le Développement pour réduire les coûts de maintenance, en privilégiant l'automatisation des transferts et en acquérant des machines plus chères (pour une plus longue durée de vie). Cet ensemble de préconisations a été intégré dans la notion de saut technologique.

e) Contradiction physique

La contradiction physique s'énonce alors de la façon suivante :

L'amplitude du saut technologique doit être faible car les coûts d'investissements doivent être faibles, et élevée à la fois car les coûts de fonctionnement doivent être également faibles.

f) Déclinaison de la contradiction physique

La contradiction physique se décline, suivant les quatre niveaux du système, comme détaillé dans le tableau 12.

Niveau	Paramètre X2
1	Les changements à répercuter sur les arête de coupe, lubrifiant et matériaux doivent être minimales pour diminuer le coût de l'investissement dans ces nouveaux matériels, et simultanément élevés car leur futurs coûts de fonctionnement doivent aussi être minimisés.
2	Les changements à répercuter sur les porte-outil doivent être minimales pour diminuer le coût de l'investissement dans ces nouveaux matériels, et simultanément élevés car leur futurs coûts de fonctionnement doivent aussi être minimisés.
3	Les changements à répercuter sur les montages d'usinage doivent être minimales pour diminuer le coût de l'investissement dans ces nouveaux matériels, et simultanément élevés car leur futurs coûts de fonctionnement doivent aussi être minimisés.
4	Les changements à répercuter sur les machines doivent être minimales pour diminuer le coût de l'investissement dans ces nouveaux matériels, et simultanément élevés car leur futurs coûts de fonctionnement doivent aussi être minimisés.

Tableau 12 : Déclinaison du paramètre X2

3.2.4) Faire des produits de Qualité

3.2.4.1) Représentation graphique

La finalité économique ne peut suffire, pour comprendre l'évolution du système de production. Les éléments de performance de la fonction « satisfaire le client » sont rappelés sur la figure (68) : la précision du produit et son délai de fabrication.

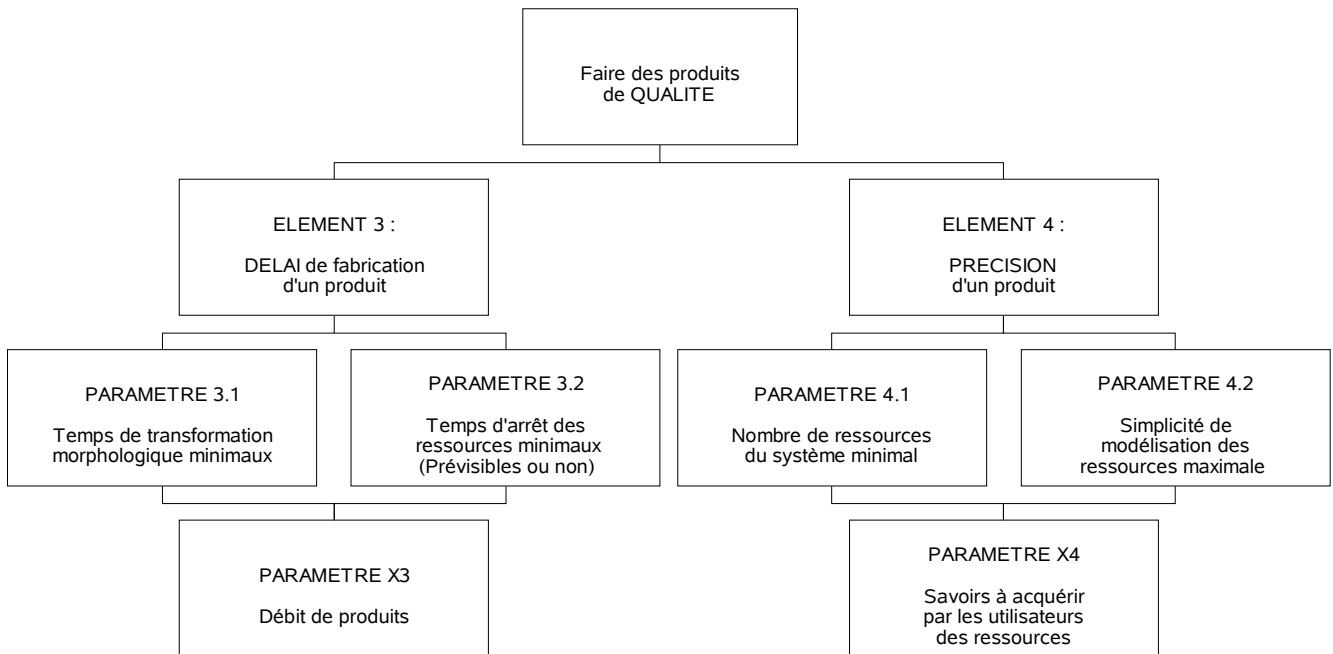


Figure 68 : Contradictions de la fonction « faire des produits de QUALITE »

3.2.4.2) Décomposition de l'élément Délai

a) Définition des paramètres

Cette contradiction technique résulte du croisement entre d'une part l'analyse temporelle des activités des sous-processus de production et l'analyse de techniques induites par la mise en œuvre de moyens d'Usinage Grande Vitesse. Les deux paramètres en contradictions se définissent ainsi :

- **Paramètre 3.1** : temps de transformation morphologique

Définition : intervalle de temps pendant lequel le produit brut est transformé par la ressource.

- **Paramètre 3.2** : temps d'arrêt des ressources

Définition : intervalle de temps pendant lequel la ressource est mise en condition (activité de lancement, préparation, transfert, contrôle et surveillance), maintenue en état de produire et à l'arrêt (en attente prévisible ou non prévisible).

Les vitesses d'avance des mobiles et de rotation de broche plaçant les composants aux limites de leurs performances (pour les roulements de broche par exemple), ou induisant l'intégration de nouvelles technologies de composants (moteurs linéaires sur les axes, par exemple), leur surveillance devient critique. Des activités telles la maintenance des équipements, l'équilibrage des porte-outil, le fretage d'outils représentent des conséquences de la volonté de diminution des temps de transformations morphologiques.

b) Déclinaison des paramètres 3.1 et 3.2

Niveau	Paramètre 3.1	Paramètre 3.2
1	Durée de formation du copeau par l'arête de coupe	Durée de mise en condition d'une arête de coupe
2	Durée de formation de la surface par l'ensemble arête de coupe et porte-outil.	Durée de mise en condition d'un porte-outil
3	Durée pendant laquelle la pièce est dans un montage d'usinage.	Durée de mise en condition d'une montage d'usinage
4	Durée pendant laquelle le lot de fabrication est dans une zone tampon affectée à une machine.	Durée de mise en condition d'une machine-outil

Tableau 13 : Déclinaison des paramètres de l'élément DELAI

c) **Illustration de la contradiction technique**

Néanmoins, chercher à réduire le délai de fabrication d'un produit se traduit par les nécessaires diminutions de la durée de sa transformation morphologique et de la durée de mise en œuvre de la ressource associée. Le délai étant la somme de ces deux durées.

Or, chercher à diminuer le délai de transformation induit une augmentation du délai de mise en condition ou d'attente dans les stocks. De même, sans modifier le système, chercher à diminuer les temps d'arrêts se traduit par un rallongement de la transformation morphologique : les ressources ne sont plus dans les conditions optimales de production.

Développons la configuration d'usinage du niveau 1. Pour une longueur d'usinage et une section de copeau données, le temps d'usinage est inversement proportionnel au débit de copeaux. Pour diminuer le temps de formation du copeau, il faut, entre autres, augmenter le débit de matière sur la face de coupe.

De plus, la durée de vie de l'outil (en prenant comme critère l'usure en dépouille) diminue avec une augmentation du débit, comme le montre [Yeh 2002]. La valeur optimale du débit ne correspond donc pas à la valeur maximale autorisée par l'arête de coupe et les composants la mettant en mouvement. Il est également montré par [Yeh 2002], la complexité de résolution du modèle permettant de déterminer la valeur optimale du débit, dans une configuration d'usinage minimaliste.

La contradiction physique concernant le débit de produits va s'en déduire.

d) **Définition du paramètre X3**

- **Paramètre X3** : Débit de produits

Définition : quantité de produits par unité de temps et par ressource.

Les produits sont compris au sens résultat d'un sous-processus du Modèle des Systèmes Opérationnels de Production. Ils incluent les extrants du système et les états intermédiaires (internes au système de production). Aussi, la mesure de cette quantité est dépendante du niveau du système. La grandeur utilisée pour mesurer la quantité de produit du i-ème niveau reste du choix de l'industriel particulier. Nous pouvons néanmoins proposer les grandeurs suivantes :

- Le débit de copeaux se mesure par le débit volumique de matière ;
- Le débit de surface se mesure par l'aire générée par un porte-outil sur un temps d'usinage donné. Dans [Larrouquère 2004], un exemple de mesure de ce type est proposé pour l'usinage de l'inconel.
- Le débit de pièces se mesure par le nombre de pièces identiques sortant d'un montage d'usinage donné, par unité de temps. Il est équivalent à la cadence de production.
- Le débit de lot se mesure par le nombre de lots transformé sur une machine, par unité de temps.

e) **Contradiction physique**

La contradiction physique s'énonce alors de la façon suivante :

Le débit de produits doit être faible pour minimiser le temps d'arrêt des ressources et élevé à la fois pour minimiser le temps de transformation des produits.

f) **Déclinaison de la contradiction physique**

Le tableau 14 propose quelques exemples de temps en contradiction pour les quatre niveaux du système. D'une manière générale, le temps d'arrêt des ressources correspond aux périodes allouées aux activités de mise en condition de la ressource, augmentées des temps d'attente dans les différents stocks.

Niveau	Paramètre X3
1	Le débit de copeaux doit être élevé pour diminuer le temps de formation d'un copeau, et simultanément faible pour diminuer les temps d'arrêt dus à une durée de vie trop courte.
2	Le débit de surface doit être élevé pour diminuer la durée de la trajectoire d'usinage, et simultanément faible car la surveillance des axes doit être efficace (pour diminuer les temps d'arrêt dus à de la maintenance curative).
3	Le débit de pièces doit être élevé pour diminuer le temps de cycle d'une sous-phase, et simultanément faible pour diminuer les temps d'arrêt dus à des changements de pièces trop fréquents.
4	Le débit de lots doit être élevé pour diminuer la durée de fabrication d'un lot et simultanément faible pour diminuer les temps d'arrêt dus à des changements de série trop fréquents.

Tableau 14 : Exemples de déclinaison du paramètre X3

Le débit est donc une variable fondamentale du système de production, pilotant les paramètres temporels affectant le délai de fabrication d'un produit. Lui attribuer la bonne valeur doit aboutir à synchroniser les différentes ressources d'un niveau donné.

3.2.4.3) Décomposition de l'élément Précision

a) Définition des paramètres

La précision est envisagée indépendamment du temps de fabrication. L'objectif, en terme de précision, est d'obtenir l'ensemble des produits d'un niveau donné dans les tolérances spécifiées dans la relation contractuelle avec le client. La minimisation du nombre de ressources par niveau traduit l'exigence de minimisation des dispersions d'usinage, causes de défaut sur le produit : dispersion de remise en position dans un montage d'usinage ou d'un porte-outil, etc...

L'objectif de précision dépend donc du nombre de ressources par niveau. Plus faible est le nombre de changements de ressources pour générer un produit final donné (quel que soit son niveau), plus faibles sont les causes de dispersion. Par contre, en diminuant ce nombre, la complexité de la ressource s'en trouve augmentée. Or, la maîtrise du comportement de la ressource durant la transformation morphologique influe directement sur la précision obtenue.

L'amélioration de la précision des produits demande une minimisation du nombre de ressources par niveau du système et une complexité minimale (ou simplicité maximale). Les deux paramètres en contradictions se définissent ainsi :

- **Paramètre 4.1 :**

Définition : nombre de ressources différentes exploitées pour transformer l'ensemble des produits d'un niveau donné.

- **Paramètre 4.2 :** simplicité de modélisation de la ressource

Définition : nombre de paramètres à surveiller sur la ressource, ses interactions temporelles et interconnexions spatiales, lors de l'action de la ressource pour maîtriser le processus de transformation morphologique.

Ces deux paramètres sont contradictoires. En diminuant le nombre de ressources différentes (sans changer le nombre de produits différents à réaliser), le nombre de paramètres à surveiller sur la ressource augmente, et inversement.

Le choix de la grandeur quantifiant le paramètre 4.2 (la simplicité des ressources) peut prêter à discussion. La complexité d'un problème a déjà été évoquée dans le chapitre précédent. La quantité de paramètres, complétée du nombre de couplages, permettaient de juger de sa complexité. Pour l'évaluation de la complexité (ou de la simplicité) d'une ressource de production, la transposition de ces deux concepts peut être enrichie par :

- La précision dans la détermination des paramètres,
- La sensibilité de la réponse du système à une variation d'un paramètre.

Néanmoins, ces deux grandeurs demeurent encore plus difficile (en UGV) à quantifier que le nombre de paramètres à surveiller, compte tenu de l'état actuel de la modélisation du procédé d'Usinage Grande Vitesse. La généralité de la contradiction, de chacune de ces deux grandeurs, avec le paramètre 4.1 ne peut également être proposée.

C'est pourquoi, l'évaluation de la simplicité de la ressource est réalisée par la quantification du nombre de paramètres à surveiller lors de son action.

b) Déclinaison des paramètres 4.1 et 4.2

Le tableau 15 décline ces paramètres pour les quatre niveaux du système.

Niveau	Paramètre 4.1	Paramètre 4.2
1	Nombre d'arêtes de coupe différentes dans un atelier.	Nombre de paramètres à surveiller sur l'arête de coupe, sa trajectoire d'usinage et sa liaison avec le porte-outil, pour maîtriser le processus d'enlèvement de matière.
2	Nombre de porte-outils différents dans un atelier.	Nombre de paramètres à surveiller sur le porte-outil, ses interconnexions avec le montage d'usinage et la machine pour maîtriser une opération d'usinage.
3	Nombre de montages d'usinage différents dans un atelier.	Nombre de paramètres à surveiller sur le montage d'usinage et son interconnexion avec la machine pour maîtriser une sous-phase.
4	Nombre de machines différentes dans un atelier.	Nombre de paramètres à surveiller sur la machine-outil et son interconnexion avec l'atelier pour maîtriser une phase d'usinage.

Tableau 15 : Déclinaison des paramètres de l'élément PRECISION

c) Illustration de la contradiction technique

En diminuant le nombre de ressources différentes, leur complexité augmente. Leur mise en œuvre exige donc la mise en œuvre pour l'opérateur de ressources intellectuelles supplémentaires, comme cela a été démontré au chapitre I, §2.4.2.2. La capacité des opérateurs à mettre en œuvre des ressources plus complexes passe par l'acquisition de nouveaux savoirs [Le Boterf 2003]. Le professionnel compétent est celui qui sait les exploiter efficacement dans de nouvelles situations. Les types de savoirs ont été détaillés dans le même paragraphe.

d) Définition du paramètre X4

- **Paramètre X4** : savoirs à acquérir par les utilisateurs des ressources
Nous rappelons les six classes de savoirs suivant :
- Savoir agir avec pertinence ;
- Savoir mobiliser des « ressources » (savoirs, savoir-faire, aptitudes ou qualités, expériences cumulées) dans un contexte professionnel ;
- Savoir combiner des « ressources » multiples et hétérogènes ;
- Savoir transposer ;
- Savoir apprendre et apprendre à apprendre ;
- Savoir s'engager.

e) Contradiction physique

- La contradiction physique s'énonce alors de la façon suivante :

La quantité de savoirs à acquérir doit être faible pour minimiser le nombre de paramètres à surveiller (ou maximiser la simplicité des ressources) et élevée à la fois pour permettre un nombre de ressources différentes minimal dans le système.

Un industriel doit savoir évaluer dans son équipe, le niveau de compétence des opérateurs, pour pouvoir décider des moyens assurant la précision des produits. Diminuer le nombre de ressources implique notamment d'investir dans de la formation des personnels, ou de chercher des professionnels hors du système de production. A l'inverse, il peut se contraindre d'exploiter des ressources de technologies plus élémentaires, ce qui implique une limitation des investissements, mais potentiellement des coûts plus élevés de fonctionnement.

3.2.5) Faire une Diversité de produits

3.2.5.1) Représentation graphique

Des définitions des éléments de performance « Flexibilité » et « Réactivité » ont été proposées, telles que ces deux grandeurs soient en contradiction dans un système donné. La figure (69) rappelle la contradiction d'évolution de la fonction « Faire une diversité de produits ».

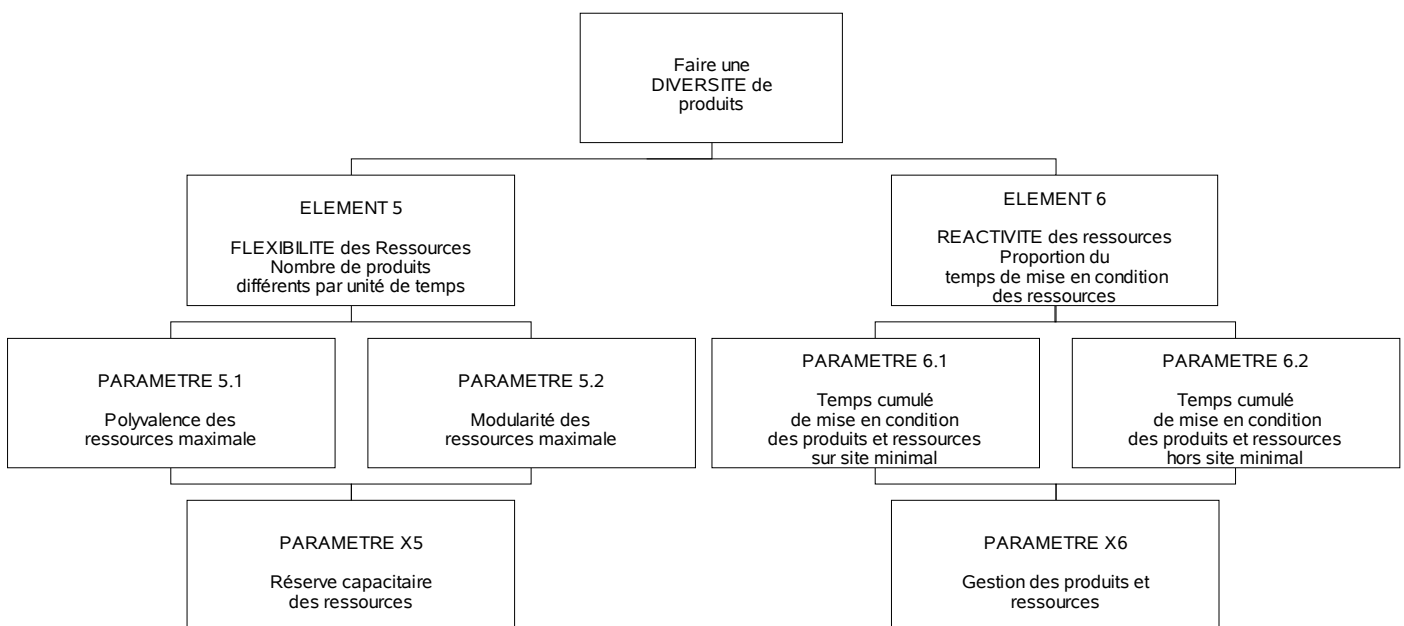


Figure 69 : Contradictions de la fonction « faire une DIVERSITE de produits »

3.2.5.2) Décomposition de l'élément Flexibilité

a) Définition des paramètres

La flexibilité des ressources n'est pour l'instant envisagée qu'au sens des ressources matérielles, et non pas humaines, du système. Elle caractérise l'aptitude des ressources à s'adapter aux produits à obtenir. La polyvalence de la ressource est

le premier paramètre identifié. Elle reste relative au système, et non pas absolue. Cette relativité est modélisée par l'unité de temps, intégrée dans la quantification de la flexibilité. Le paramètre contradictoire naît du besoin de maximiser la flexibilité, avec une ressource non polyvalente, soit spécialisée à un produit donné.

Le niveau de modularité de la ressource est le paramètre permettant d'utiliser une ressource spécialisée pour un autre produit. Une ressource universelle et modulaire a un sens physique mais pas dans l'objectif d'améliorer la flexibilité. De même, une ressource dédiée à un produit et monobloc n'est absolument pas flexible, mais a un sens physique. Les deux paramètres en contradictions se définissent ainsi :

- **Paramètre 5.1** : polyvalence des ressources

Définition : la polyvalence d'une ressource se caractérise par son niveau d'indépendance au regard des produits qu'elle génère.

Une ressource idéalement polyvalente ne nécessite pas d'activité de préparation pour un changement de produit. A l'inverse, une ressource dédiée n'est pas flexible, puisqu'elle ne peut réaliser qu'un seul produit.

- **Paramètre 5.2** : modularité des ressources

Définition : nombre de modules constituant la ressource

Une ressource modulaire est en fait une ressource dédiée à un produit, mais qui peut être reconfigurée pour obtenir d'autres. Elle nécessite donc de la préparation pour un changement de produit.

b) Déclinaison des paramètres 5.1 et 5.2

Le tableau 16 décline ces paramètres pour les quatre niveaux du système.

Niveau	Paramètre 5.1	Paramètre 5.2
1	Indépendance de l'arête de coupe par rapport au matériau à usiner.	Nombre de modules constituant l'arête de coupe
2	Indépendance du porte-outil par rapport à la surface à usiner.	Nombre de modules constituant un porte-outil
3	Indépendance du montage d'usinage par rapport à la pièce à usiner.	Nombre de modules constituant un montage d'usinage
4	Indépendance de la machine par rapport au lot de fabrication transformer.	Nombre de modules constituant une machine-outil

Tableau 16 : Déclinaison des paramètres de l'élément FLEXIBILITE

c) Illustration de la contradiction technique

En choisissant une ressource universelle (extrêmement polyvalente), le concepteur s'autorise une réserve capacitaire sur la ressource. Pour chaque produit, une partie des performances techniques de la ressource n'est pas exploitée. Inversement, une ressource modulaire est, une fois assemblée, unique, soit dédiée à

un produit. La réserve capacitaire sur la ressource assemblée est donc nulle. La réserve capacitaire est donc la variable soumise à la contradiction physique, liée à l'élément de performance « Flexibilité ».

d) Définition du paramètre X5

- **Paramètre X5** : Valeur de la réserve capacitaire

Définition : Capacité de transformation de la ressource exploitable sans temps de mise en condition supplémentaire.

e) Contradiction physique

La contradiction physique s'énonce alors de la façon suivante :

La réserve capacitaire doit être faible pour maximiser la modularité des ressources et élevée à la fois pour maximiser la polyvalence des ressources.

L'identification des paramètres des ressources sur lesquels porte la réserve capacitaire ne peut être exhaustive, vue la complexité du système.

f) Déclinaison de la contradiction physique

Des exemples de déclinaison de la variable du système de production sont donnés dans le tableau 17.

Niveau	Paramètre X5
1	La réserve capacitaire de l'arête de coupe (par rapport à la section maximale de copeau, température de transformation, durée de vie) doit être élevée car elle doit pouvoir transformer un grand nombre de matériaux et simultanément faible pour être adaptée à un matériau donné, en restant flexible.
2	La réserve capacitaire du porte-outil (par rapport aux sollicitations dynamiques, à l'accessibilité des surfaces...) doit être élevée car il doit pouvoir être utilisé pour un grand nombre de surface et simultanément faible pour être adapté à chaque surface, en restant flexible.
3	La réserve capacitaire du montage d'usinage (sur l'effort de serrage, la dispersion de remise en position, ...) doit être élevée car il doit pouvoir être utilisé pour un grand nombre de pièces différentes et simultanément faible pour être adapté à chaque géométrie, en restant flexible.
4	La réserve capacitaire de la machine (courses, vitesses des axes, puissance des moteurs...) doit être élevée car elle doit pouvoir transformer un grand nombre de lots différents et simultanément faible pour être adaptée à un matériau donné, en restant flexible.

Tableau 17 : Déclinaison du paramètre X5

Comme le paramètre X4, les choix à faire sur X5 ont des conséquences économiques, ou peuvent être guidés par des contraintes économiques. Par

exemple, une grande réserve capacitaire peut impliquer des coûts initiaux des ressources élevés, tout comme des coûts d'infrastructure (surface au sol...).

3.2.5.3) Décomposition de l'élément Réactivité

a) Définition des paramètres

La mesure de la réactivité permet de quantifier la proportion allouée (pendant une unité de temps) à la mise en condition de chaque ressource. Cet élément représente la mesure temporelle de la finalité de fabrication d'une variété de produits. Elle est en contradiction avec la flexibilité qui, comme le justifient ses paramètres, en représente la mesure spatiale, de part les choix des technologies utilisées pour les composants du système.

La mise en condition des ressources ne peut se faire que de deux manières : en immobilisant la zone d'usinage (le volume de travail de l'outil de coupe), nommée « mise en condition sur site », ou en dehors de la zone d'usinage, nommée « mise en condition hors site ».

L'amélioration de la réactivité, correspondant à la diminution globale de la durée de mise en condition, implique de diminuer simultanément les paramètres suivant :

- **Paramètre 6.1** : Temps cumulé de mise en condition des ressources sur site

Définition : temps cumulé alloué au activités de lancement, préparation, transfert, contrôle, surveillance et maintenance curative des ressources, obligeant l'arrêt de la transformation morphologique des produits.

- **Paramètre 6.2** : Temps cumulé de mise en condition des ressources hors site

Définition : temps cumulé alloué au activités de lancement, préparation, transfert, contrôle, surveillance et maintenance curative des ressources permettant la transformation morphologique simultanée des produits.

Si une transformation morphologique a lieu pendant de la mise en condition hors site, alors le paramètre 6.2 correspond à du temps masqué.

Or, à toutes choses égales par ailleurs, les durées respectives de chaque ensemble d'activités ainsi localisées sont contradictoires. Diminuer la durée de mise en condition sur site se traduit, sans évolution du système, par une augmentation de la mise en condition hors site, et inversement. Comme cela a été démontré dans le paragraphe 3.2.1.2, le temps de mise en condition pour un niveau donné s'écrit :

$$Tmc_i = \sum_{j=1}^{j=N_i} (Tmc_{ij}) \quad (3.2.5.3.i)$$

$$\text{Or : } Tmc_{ij} = Tmc_{ij}(\text{sur site}) + Tmc_{ij}(\text{hors site}) \quad (3.2.5.3.ii)$$

La réactivité est donc la somme des deux proportions, et démontre la contradiction physique.

b) Déclinaison des paramètres 6.1 et 6.2

Le tableau 18 présente la déclinaison des deux paramètres de cet élément de performance.

Niveau	Paramètre 6.1	Paramètre 6.2
1	Proportion de la durée de mise en condition des arêtes de coupe, montées dans la broche.	Proportion de la durée de mise en condition des arêtes de coupe hors broche.
2	Proportion de la durée de mise en condition des porte-outils montés dans la broche.	Proportion de la durée de mise en condition des porte-outils hors broche.
3	Proportion de la durée de mise en condition des montages d'usinage montés sur axes de la machine.	Proportion de la durée de mise en condition des montages d'usinage hors de la zone d'usinage.
4	Proportion de la durée de mise en condition des machines dans l'atelier.	Proportion de la durée de mise en condition des machines hors de l'atelier.

Tableau 18 : Déclinaison des paramètres de l'élément REACTIVITE

c) Illustration de la contradiction technique

Comme nous traitons de l'évolution du système physique de production, la gestion est vue sous l'angle des activités menées au niveau opérationnel. Elles concernent l'adaptation quotidienne de l'atelier, l'affectation des moyens et personnel, et la gestion courante des stocks [Martinet 2003].

Si toute la mise en condition est effectuée sur site, les outils de gestion se résument à l'optimisation de l'ordonnancement des activités. A partir du moment où des activités sont menées hors site, leur coordination avec les activités sur site est nécessaire, pour minimiser leur durée.

d) Définition du paramètre X6

- **Paramètre X6** : gestion des ressources et des produits

Définition : activités de gestion opérationnelles spécifiques à la recherche d'une organisation efficace de la production des biens.

e) Contradiction physique

La contradiction physique s'énonce de la façon suivante :

La gestion des ressources et des produits doit être faible pour minimiser le temps de mise en condition sur site et élevée à la fois pour minimiser le temps de mise en configuration hors site.

Concernant l'évaluation de la flexibilité et de la réactivité, l'unité de temps sur laquelle sont faites les mesures des grandeurs respectives a pour seule contrainte d'être rigoureusement identique pour les deux éléments. Elle peut prendre un sens

physique en étant fixée de manière réaliste par rapport à la phase considérée du cycle de vie de la ressource (donc fonction du système particulier).

4) L'UGV une solution à quels problèmes ?

Le paragraphe précédent a détaillé la construction du modèle de problèmes d'un système de production usinant. Il sert de base pour proposer un cadre permettant de formaliser à quelles classes de problèmes généraux, l'UGV est une solution envisageable.

Après une synthèse complète de la décomposition des contradictions d'évolution, un schéma d'investigation des solutions aux problèmes génériques est proposé. Les impacts de l'introduction de l'UGV sont alors structurés suivant les effets des variations des Paramètres X sur les éléments de performance E.

4.1) Synthèse du modèle de problèmes

A chaque élément de performance du système correspond un paramètre clé (une variable du système, selon le PSD) qui guide les décisions de conception relatives à cet élément. L'explication du besoin d'évolution d'un système de production peut se résumer sous l'expression suivante :

Si le système ne peut pas faire bien (être précis) tous les produits (être flexible), tout de suite (être réactif), rapidement (être dans les délais), au moindre coût (minimiser les outflows) et au meilleur prix (maximiser les inflows), alors il doit évoluer.

La modélisation de l'évolution d'un système a ainsi mis en évidence six classes de problèmes potentiels : les problèmes de précision des produits, de délai de fabrication, de réactivité et de flexibilité, ainsi que leurs correspondances économiques avec les Inflows et les Outflows.

La résolution de chaque type de problèmes demande d'agir sur les paramètres Xi. Les décisions guidant l'évolution portent sur :

- Le débit de produit sur une ressource donnée ;
- Les savoirs à acquérir par les utilisateurs des ressources ;
- La réserve capacitaire des ressources ;
- Le niveau de gestion des produits et des ressources ;
- Le niveau de standardisation des ressources ;
- L'amplitude du saut technologique des ressources.

Chaque formulation ci-dessus, naissant du « conflit » entre un produit et une ressource, est déclinable à chaque niveau du système. Ainsi, 24 paramètres critiques sont dénombrés de manière structurée et générique. Leur expression est déduite de la décomposition des contradictions d'évolution niveau par niveau, comme le suggère OTSM-TRIZ. La figure (70) synthétise, sous forme de diagramme de classes, les relations de type contradictions entre éléments de performance, paramètres de conception et variables du système pour les trois fonctions identifiées. Ce diagramme

de classes est une vue synthétique du modèle de problèmes. La version complète, incluant les attributs, méthodes et interfaces se trouve en annexe E2 de ce mémoire.

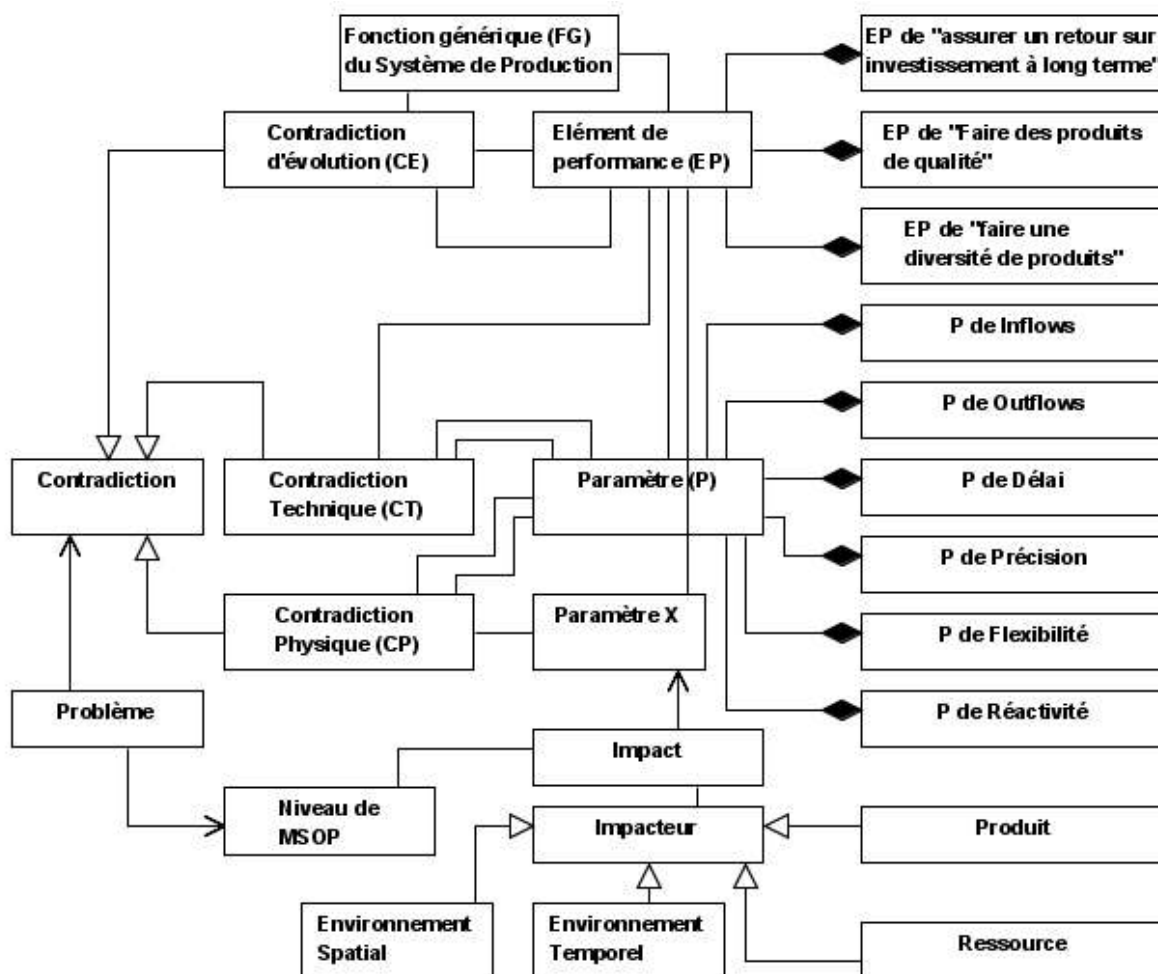


Figure 70 : Diagramme de classes synthétique du modèle de problèmes en UML

4.2) Reformulation des objectifs

La reformulation du problème, sous la forme de contradictions, permet de comprendre ses causes d'apparition dans le système. Deux cas peuvent se présenter lors de la phase de leur résolution.

- C1 : le concepteur peut agir sur les ressources existantes par l'intermédiaire des paramètres X. Il s'agit alors d'une optimisation du système.
- C2 : les performances maximales du système sont atteintes, sans pouvoir répondre à la valeur cible. Le système est alors obligé d'évoluer, en introduisant de nouvelles ressources.

Introduire l'UGV n'est pas une optimisation du système existant. Même si la classe de procédé reste la même, de nouvelles ressources sont requises pour sa mise en œuvre et son exploitation. Les deux modes d'évolution, traduisant les objectifs stratégiques de l'introduction de l'UGV, exprimés au cours du chapitre Deux, peuvent être mis en cohérence avec cette approche. En y intégrant la notion de « problème », ils peuvent être reformulés.

- **Mode 1 : Exploiter les impacts de l'Usinage Grande Vitesse pour améliorer des critères stratégiques, en résolvant conjointement les problèmes particuliers reformulés du système, sans en générer de nouveaux.**
- **Mode 2 : Résoudre les problèmes particuliers reformulés du système par l'implémentation de l'UGV, sans en générer de nouveaux, et en valoriser ensuite la maîtrise technologique dans le secteur industriel.**

Ces deux formulations montrent que l'introduction de l'UGV est envisagée comme un moyen de résoudre partie des problèmes particuliers, mais aussi comme une source de nouveaux problèmes potentiels. Le lien, entre ces vues d'un même processus (l'introduction de l'UGV), est modélisé selon OTSM-TRIZ par l'influence du paramètre X_i sur l'élément de performance E_i . Nous pouvons ajouter que l'aspect économique de la formulation du chapitre Deux disparaît dans cette nouvelle expression. Ce choix se justifie par la complexité, démontrée en fin de chapitre Deux, de la quantification des coûts induits, dans les phases amont, et par l'inefficacité du concept de coût comme ressource partagée de communication. Les aspects financiers sont ainsi reformulés au travers de problèmes.

C'est pourquoi, la satisfaction des deux modes possibles passe par la connaissance de l'influence des variations des valeurs d'une variable du système (paramètre X_i) sur l'élément de performance E_i associé. Le prochain paragraphe a pour objet de proposer, dans la mesure du possible, pour l'UGV, une formalisation des effets de telles variations, sur celles des éléments de performance E_i .

4.3) Résolution des contradictions physiques

OTSM-TRIZ ne donne pas de règle générale permettant de guider la résolution des problèmes. Des outils sont donnés pour assister le sous-processus de construction des solutions générales (cf. §2.2.1). Seules les connaissances du système et des lois des systèmes (ici de production) sont les moyens de résoudre les problèmes.

Après une présentation du cadre général, déduit de notre interprétation de la technique des contradictions, les tendances génériques de l'évolution vers l'UGV sont synthétisées.

4.3.1) Cas général

L'influence du paramètre X_i sur E_i est difficile à prévoir, pour une instanciation à un niveau « partiel ». La figure (71) sert de support à cette démonstration. Elle modélise une situation où la valeur recherchée de l'élément de performance est minimale. En d'autres termes, la performance correspondante à E_i est optimale lorsque l'élément de performance E_i est minimal.

L'hypothèse, où E_i est la somme des deux paramètres P_{i1} et P_{i2} , est adoptée pour cette démonstration. Cette hypothèse correspond à toutes les contradictions d'évolution du modèle de problèmes. Seule pour la « précision » (E4), dépendante du nombre de ressources différentes et de la simplicité de leur surveillance, l'utilisation d'une somme n'a pas de justification mathématique, dans l'état actuel de nos connaissances. Elle est assimilable à l'union de ces deux paramètres.

Deux configurations peuvent se présenter :

- Si $E_i(X_i) = E_{ih}$ (cf. figure (71)) :

Cette configuration se rencontre dans un système particulier, où la différence entre la valeur perçue de l'élément de performance est loin de son objectif (ici valeur minimale). Un « problème » apparaît alors à un des centres de décision du système.

Une même valeur de E_i correspond, dans cette configuration, à deux valeurs distinctes de X_i (X_{ia} et X_{ic}). Seule la connaissance de l'état du système particulier (position dans la zone A ou dans la zone C) permet de prédire l'évolution de la valeur de l'élément de performance, avec une variation de X_i . Aucune proposition générique ne peut ainsi être extraite à propos de l'influence de X_i sur E_i .

- Si $E_i(X_i) = E_{ib}$ (cf. figure (71)) :

Dans cette configuration, une variation de X_i n'a pas d'influence significative sur l'élément de performance. De plus, cette configuration ne correspond pas à une situation à problème, puisque E_{ib} est la valeur recherchée de E_i . Cette configuration correspond au Mode 2 exposé dans le paragraphe précédent. Une éventuelle évolution du système ne doit pas dégrader la valeur de l'élément de performance.

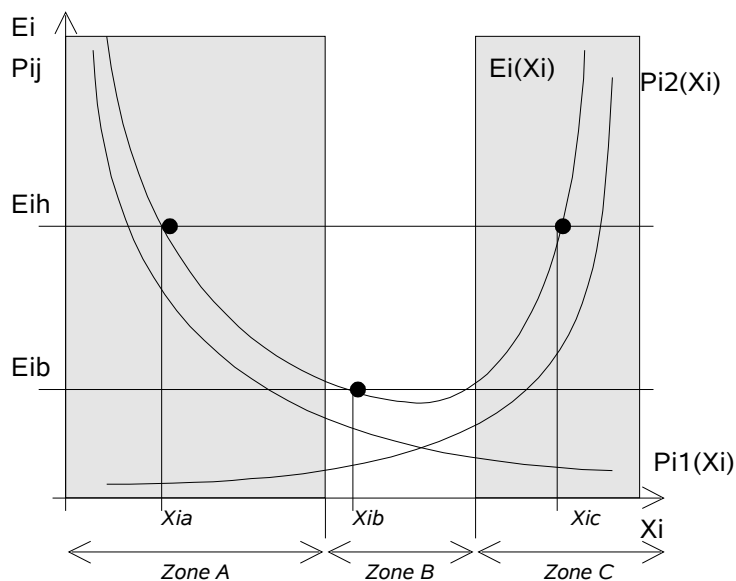


Figure 71 : Modélisation de $E_i(X_i)$

D'un autre côté, la modélisation par schéma-bloc du modèle des contradictions a montré que la valeur de X_i influait sur E_{i+1} ou X_{i+1} sur E_i ($i=1,3,5$). La démonstration quantitative de cette influence demeure encore, dans l'état actuel de nos connaissances, impossible.

Le tableau 19 résume néanmoins les résultats de nos constatations (à partir d'applications dans le domaine de l'usinage).

Contradiction d'évolution		Paramètre X_i		Paramètre X_{i+1}	
		Bas	Haut	Bas	Haut
Éléments de performance	E_i	?	?	Effet	Effet opposé
	E_{i+1}	Effet	Effet opposé	?	?

Tableau 19 : Action des paramètres X_i sur les éléments de performance

En résumé, l'influence de X_i sur E_i (et X_{i+1} sur E_{i+1}) ne peut être prédite dans un cas générique. Par contre, si X_i est initialement au niveau Bas, sa variation vers le niveau Haut a un effet sur E_{i+1} . Si le niveau Bas de X_i produisait un effet sur E_i , alors le passage au niveau Haut de X_i entraîne l'effet opposé sur E_i . La validité de cette proposition pour tous les niveaux du système, est due au raisonnement basé sur les couples [produits – ressources]. Il est modélisé par la classe « Niveau du MSOP » sur le diagramme de classes des contradictions (cf. figure (70)). C'est la même classe que celle utilisée dans le diagramme des classes du Modèle des Systèmes Opérationnels de Production de la figure (54) (cf. p.121).

Cette influence « croisée » est modélisée sur le diagramme de classes des contradictions (cf. figure (70)) par une association entre les classes « Paramètre X » et « Élément de performance ». L'attribut dérivé à la classe « Paramètre X » exprime cette propriété de dépendance.

Un raisonnement, basé sur le principe d'intensification des contradictions physiques, permet d'apporter des éléments de compréhension et de justification. Intensifier une contradiction physique revient à assigner, à un paramètre X_i donné, des valeurs extrêmes, voire absurdes. Ce processus permet de mieux mettre en évidence l'effet des variables sur les paramètres et les éléments de performance.

Prenons l'exemple de la précision. Un système, passant d'une cadence donnée à une cadence infinitésimale, peut assurer une meilleure précision de ses produits. En effet par cette évolution, toutes les activités de mise en condition peuvent être menées sur des durées infinies, permettant ainsi l'optimisation de l'activité de transformation morphologique. A l'inverse, un système passant d'une cadence donnée à une cadence infinie, voit ses activités de mise en condition réduites à néant et l'optimisation de l'activité de transformation morphologique impossible. La précision des produits est alors dégradée.

4.3.2) Application à l'UGV en mécanique générale

Ce paragraphe concerne l'évolution d'ateliers d'usinage du secteur de la mécanique générale, en excluant ainsi les secteurs de l'aéronautique ou de l'outillage des procédés de mise en forme. Ces domaines sont exclus de notre étude car l'UGV y est déjà largement implanté. Le processus d'introduction y est donc déjà finalisé. Par contre, nous n'excluons pas de pouvoir appliquer nos modèles dans le cadre de projets d'évolution de ces ateliers, ayant pour objectif l'optimisation de l'utilisation de l'UGV.

Le modèle des systèmes opérationnels permet de définir plus précisément ce secteur suivant une vue [produit-ressource].

- Matériaux : non limités aux alliages d'aluminium ou les aciers à outillage.
- Surfaces fonctionnelles : 2 axes et demi.
- Pièces : bruts non obtenus à partir de barres.
- Lots : séries non unitaires.

Pour chaque contradiction d'évolution, les tendances d'évolution de l'élément de performance sont proposées en fonction des variations des paramètres X « croisés ». Nous avons choisi de présenter ces tendances sous forme de tableaux, pour chaque fonction de référence du système de production.

Les variations indiquées sur chaque paramètre X sont toujours exprimées par rapport à la situation initiale du système de production. Il en est de même pour les influences sur les éléments de performance. Par exemple, dans le tableau 20, un débit de produits « Diminué » (par rapport à sa valeur actuelle) provoque une précision « Très Améliorée ». Dans ce même tableau, un point d'interrogation représente l'impossibilité de toute prévision générique de l'influence du débit sur le Délai ou des Savoirs sur la Précision.

4.3.2.1) Qualité des produits

L'UGV en tant que procédé de transformation morphologique influe principalement sur la qualité des produits, comme cela été démontré dans le chapitre Un. Le tableau 20 formalise notre proposition de caractérisation qualitative des effets de l'UGV sur cette classe d'éléments de performance.

Qualité des produits		Paramètre X3			Paramètre X4		
		Débit de produits			Savoirs à acquérir		
		Diminué	Inchangé	Augmenté	Aucun	Faibles	Elevés
Éléments de performance	E3 : Délai	?	?	?	Très Dégradé	Dégradé	Inchangé
	E4 : Précision	Très améliorée	Améliorée	Inchangée	?	?	?

Tableau 20 : Effets des variations de X3 et X4 sur E3 et E4 avec l'UGV

Le tableau 20 s'explique par la proposition d'influence de l'introduction de l'UGV sur la PRECISION des produits.

- L'UGV peut permettre d'augmenter le débit de produit, en conservant la même précision sur chaque produit (case [Débit augmenté ; Précision Inchangée]).
- L'UGV peut permettre d'améliorer la précision des produits en conservant le même débit de produit (case [Débit inchangé ; Précision Améliorée]).

Démontrons cette proposition pour les niveaux 1 et 2 (pour l'obtention de copeaux et de surfaces). Le débit de copeau est le produit de la section du copeau et de la vitesse de coupe. A débit constant, l'augmentation de la vitesse de coupe autorise une diminution inversement proportionnelle de la section du copeau. Les efforts de coupe diminuent et le processus d'enlèvement de matière devient adiabatique irréversible ; d'où l'amélioration de la précision (formation du copeau, état de surface et tolérances dimensionnelles).

Concernant les critères de précision des niveaux 3 et 4, l'UGV, vu suivant le processus d'enlèvement de matière, ne peut directement être porté pour responsable de ce gain potentiel. L'évolution des technologies des structures, des axes des machines et de leurs asservissements appuie néanmoins cette proposition.

Pour les délais des produits :

- L'UGV n'améliorera pas directement les délais, même en augmentant les savoirs des utilisateurs (case [Savoirs Élevés ; Délai Inchangé]).
- Sans changer les compétences des opérateurs, les délais vont s'allonger (case [Savoirs Aucun ; Délai Très Dégradé]).

Cette proposition reflète l'allongement de la durée des activités de mise en condition des quatre classes de ressources. La durée de la préparation des ressources et des produits brut, des activités de maintenances préventive et curative sont allongées et nécessitent des connaissances actualisées sur les nouvelles technologies.

4.3.2.2) Diversité des produits

Les activités de transformation morphologique n'ont pas de conséquence directe sur la flexibilité et la réactivité. C'est la répétition de ces activités qui fait naître des problèmes de cette catégorie. C'est pourquoi l'UGV n'influe pas directement sur ces deux éléments de performance. Par contre, le choix des technologies utilisées pour les ressources influe sur leur future mise en condition.

Le tableau 21 formalise nos propositions pour cette catégorie de problèmes.

Diversité des produits		Paramètre X5			Paramètre X6		
		Réserve capacitaire			Gestion des ressources		
		Diminuée	Inchangée	Augmentée	Moins	Autant	Plus
Éléments de performance	E5 : Flexibilité	?	?	?	Dégradée	Inchangée	Améliorée
	E6 : Réactivité	Dégradée	Inchangée	Améliorée	?	?	?

Tableau 21 : Effets des variations de X5 et X6 sur E5 et E6 avec l'UGV

Le tableau 21 s'explique par la proposition d'influence de l'introduction de l'UGV sur la Réactivité et la Flexibilité des ressources.

Pour la Réactivité des ressources :

- L'UGV a tendance à ne pas utiliser de ressources modulaires (vibrations, rigidité, équilibrage...). La polyvalence forcée des ressources implique une certaine réserve capacitaire qui peut améliorer la réactivité (case [Réserve capacitaire Augmentée ; Réactivité Améliorée]).
- Pour ne pas créer de nouveau problème de réactivité, il ne faut pas diminuer la réserve capacitaire des ressources, en introduisant de l'UGV (case [Réserve capacitaire Diminuée ; Réactivité Dégradée]).

Pour la Flexibilité des ressources :

- L'UGV pousse à effectuer des activités de mise en condition hors site et ainsi de s'équiper en moyens supplémentaires de gestion des ressources b (case [Réserve capacitaire Augmentée ; Réactivité Améliorée]).
- Pour ne pas créer de nouveau problème de Flexibilité, il ne faut pas diminuer le niveau de gestion des ressources, en introduisant de l'UGV (case [Gestion Diminuée ; Flexibilité Dégradée]).

4.3.2.3) Retour sur investissement

Comme les aspects économiques sont le reflet des choix technologiques, organisationnels et stratégiques, il est a priori impossible de prédire l'influence des paramètres X1 et X2 sur les deux éléments de performance. Ce doute se traduit manifestement dans le tableau 22.

Les tendances relatives à ces deux éléments ne sont pas formulables de façon générique. Elles sont dépendantes des situations initiales des systèmes de production. Cela se reflète particulièrement pour l'amplitude du saut technologique. Par exemple, des ateliers équipés en moyens d'usinage conventionnels ou à commande numérique ne suivront pas le même scénario d'évolution.

Retour sur investissement long terme		Paramètre X1			Paramètre X2		
		Standardisation des ressources			Amplitude du saut technologique		
		Diminuée	Inchangée	Augmentée	Nul	Faible	Elevé
Éléments de performance	E1 : Inflows	?	?	?	?	?	?
	E6 : Outflows	?	?	?	?	?	?

Tableau 22 : Imprévisibilité des aspects économiques

Seule une proposition concerne la standardisation des ressources et des bruts. Vue la complexité des ressources, les développements spécifiques sont onéreux et impliquent des coûts du cycle de vie plus élevés. L'augmentation de la standardisation des ressources est une tendance observée pour y remédier.

5) Conclusion

Le modèle des problèmes offre un cadre exhaustif pour le classement des problèmes d'un industriel. Les finalités d'un système de production, sur les points de vue économiques et techniques, sont reliées à des éléments de performances. Ces grandeurs mesurables sont contrôlées par des paramètres de conception, eux-mêmes dépendants de variables du système de production.

L'évolution du système (introduction de nouvelles ressources matérielles d'usinage) est due à un écart trop grand entre les performances attendues du système et les réelles. Si l'optimisation du système ne suffit pas à combler cet écart, le concepteur est face à une contradiction organisationnelle, que le modèle proposé aide à dépasser.

Ce modèle offre l'avantage, puisqu'il est associé à celui des systèmes opérationnels de production, de diminuer le nombre de concepts différents, à gérer lors de la définition des besoins. Seules trois paires d'éléments de performances et six variables génériques sont à analyser.

Les impacts de l'introduction de l'UGV sur les ressources, produits, interactions temporelles et interconnexions spatiales sont ensuite présentés suivant ces relations duales entre paramètre X et élément de performance. Le diagramme de classes des contradictions de la figure (70) (cf. p 169) modélise ces relations par la présence de la classe « Impact » et ses associations avec les classes « Paramètre X » et « Niveau du MSOP ».

Nous proposons sur la base de cette analyse des impacts, de formuler de manière générique, les influences sur les éléments de performance, des variations induites sur les paramètres X (par l'introduction de l'UGV). Ces tendances, pour chaque niveau du MSOP, se résument ainsi :

- L'UGV peut permettre d'augmenter le débit de produit, en conservant la même précision sur chaque produit.

- L'UGV peut permettre d'améliorer la précision des produits en conservant le même débit de produit.
- L'UGV n'améliorera pas directement les délais, même en augmentant les savoirs des utilisateurs.
- Sans changer les compétences des opérateurs, les délais vont s'allonger.
- L'UGV a tendance à ne pas utiliser de ressources modulaires (vibrations, rigidité, équilibrage...). La polyvalence forcée des ressources implique une certaine réserve capacitaire qui peut améliorer la réactivité.
- Pour ne pas créer de nouveau problème de réactivité, il ne faut pas diminuer la réserve capacitaire des ressources, en introduisant de l'UGV.
- L'UGV pousse à effectuer des activités de mise en condition hors site et ainsi de s'équiper en moyens supplémentaires de gestion des ressources.
- Pour ne pas créer de nouveau problème de Flexibilité, il ne faut pas diminuer le niveau de gestion des ressources, en introduisant de l'UGV.

La pertinence de ce modèle, sa robustesse et ses limites sont mises à l'épreuve dans le chapitre suivant. La démarche proposée l'exploite, associée aux modèles des systèmes opérationnels de production. Elle a pour but de diagnostiquer le système usinant particulier et de construire des architectures de solutions pour étudier la faisabilité de l'introduction de l'UGV.

Enfin, la diversité des études de cas va contribuer à apporter des éléments supplémentaires à la justification de la généralité (pour le domaine de l'usinage) du modèle des problèmes à tous les niveaux du système.

Chapitre 4 : Démarche de conception et cas d'étude

La méthode de conception PIA, orientée problèmes, a été présentée au chapitre Trois. PIA est une méthode de conception des systèmes de production usinant, définie par :

- Des modèles de référence : le MSOP et le modèle de Problèmes ;
- Un cycle d'abstraction intégrant la notion d'architecture du système. La définition partagée d'une architecture particulière assure la cohérence des différents domaines impliqués dans le projet entre les points de vue stratégiques et opérationnels.
- Une démarche d'application des modèles, résultant à la définition de cette architecture du système cible. Ce modèle organisationnel assure la cohérence de la conception du système au cours des phases de conception pluridisciplinaires.

Ce chapitre présente ce dernier élément : la démarche générique de conception de l'architecture du système de production appliquée à l'introduction de l'Usinage Grande Vitesse. Elle exploite les modèles présentés au cours des chapitres précédents. Cette démarche représente la vue dynamique de la méthode PIA (Problem Integrated Approach). Le secteur PF1 du site de Haguenau du groupe international SEW-EURODRIVE fait l'objet d'une collaboration à long terme, autour du projet d'évolution de ses méthodes d'usinage.

Le contexte industriel de ce projet est présenté dans un premier temps. Puis, les phases de la démarche sont explicitées. Pour chacune d'elles, les différentes tâches à effectuer sont détaillées en formalisant les objectifs, contraintes, variables d'action, connaissances nécessaires et critères d'évaluation. L'étude menée chez Usocom illustre l'application concrète des étapes successives.

Enfin, une discussion est menée sur la validation globale de la méthode du point de vue industriel. Dans ce cadre, ses limites sont relevées et des améliorations proposées.

1) Introduction

1.1) Contexte industriel

SEW-EURODRIVE est un groupe familial international. Il compte 9300 employés et affiche un chiffre d'affaires annuel de 1 032 M€. Il est un des leaders dans la fabrication, l'assemblage de systèmes électriques d'entraînement et pour les services associés. Tous les composants sont fabriqués sur des sites de production en Allemagne, France, États-Unis, Chine et Brésil. Les produits finaux sont assemblés sur 58 sites, également à l'échelle mondiale.

Un atelier du site SEW Usocom de Haguenau (France, 67), filiale du groupe SEW-EURODRIVE, sert de support à cette étude. Ce site est un des deux sites

français de production, avec celui de Forbach (France, 57). 1500 personnes sont employées sur le site, à la production et l'assemblage de moto-réducteurs complets de petites et moyennes dimensions, en petites, moyennes ou grandes séries.

Environ 400 références (des carters et des flasques) sont usinées annuellement dans ce secteur et, en moyenne chaque semaine, 200 références différentes y sont en cours de transformation. Les pièces en fonte moulée Ft25 sont usinées et lavées dans cet atelier et représentent 90% des extrants du système. Les 10% restant sont des pièces en aluminium (pour les boîtes à bornes des moteurs électriques) usinées dans la barre, sur des centres de fraisage standards. Le moulage au sable et la peinture (avant usinage) sont les seules phases externalisées.

Les phases d'usinage sont effectuées sur des moyens de production organisés en îlots de production (par famille de pièces). Une grande variété d'équipements y est implantée. Des machines conventionnelles de tournage et de fraisage, des machines spéciales, des machines transfert, des perceuses à colonne multi-broche manuelles, des centres de tournage verticaux et des centres de fraisage horizontaux à commande numérique, y fonctionnent. Aucune machine, dite UGV, n'est à l'heure actuelle en production.

1.2) Origines et cadrage initial du projet

Le lancement du projet d'introduction de l'UGV dans l'atelier est le fruit de plusieurs cheminements menés en parallèle.

- L'UGV est depuis 2002 envisagé dans l'atelier de production. En effet, un autre secteur du même site et un site allemand se sont équipés de nouveaux moyens. Les performances économiques n'y sont pas encore au niveau des objectifs. Comme le responsable du secteur, et aucun des autres centres de décision de l'atelier, ne disposent d'une vision suffisamment globale des potentiels et contraintes du procédé, le projet est resté en gestation.
- Les clients et le reste du groupe exercent des pressions sur le bureau des Méthodes centrales. En outre, ce service a également pour tâche de coordonner la veille technologique des sites de production français et allemands.
- Une première collaboration avec Usocome concernait, via une étude d'ingénierie fin 2002, la reconception d'un montage d'usinage multipostes, de cet atelier. Les conclusions du projet nous ont conduit à discuter de la définition des besoins réels, que devaient satisfaire une telle reconception. Cela se traduit notamment par des interrogations au sujet du sous-système étudié : n'a-t-il pas atteint ses limites de performances et l'UGV peut-il y apporter une amélioration du résultat ?

D'un commun accord entre le responsable des Méthodes centrales et le responsable de l'atelier, l'introduction de l'UGV est envisagée suivant le deuxième mode identifié au chapitre Deux.

Mode 2 : Résoudre les problèmes particuliers reformulés de l'atelier d'usinage des carters et flasques, sans en créer de supplémentaires, par l'implémentation de l'UGV et en valoriser ensuite la maîtrise technologique dans le secteur industriel.

2) Vue dynamique de PIA

Après la description générique de la méthode PIA sur la base du diagramme de cas d'utilisation (UML), la vue dynamique (la démarche d'application) est présentée.

2.1) Description détaillée de la méthode PIA

PIA (Approche Intégrée par les Problèmes) est la méthode de conception des systèmes de production (pour l'instant orientés usinage) dont une partie des éléments a été proposée dans [Geiskopf 2004c]. PIA se caractérise par un ensemble de concepts et une démarche d'application.

- Les objectifs (intermédiaire et final) : de la formulation des besoins à la validation d'une architecture complète, d'une solution adaptée à un système de production particulier ;
- Le cycle d'abstraction, utilisant les notions de problèmes et d'architecture du système pour construire un espace partagé de communication ;
- Le Modèle des Systèmes Opérationnels de Production ;
- Le modèle des problèmes, basé sur la technique des contradictions d'OTSM-TRIZ ;
- La démarche d'application, développée dans ce chapitre. Elle combine les principes de la **Dialectique** avec ceux des **contradictions**.

La figure (72) présente le diagramme des cas d'utilisation de la méthode PIA. Il permet ainsi de modéliser les fonction de la méthode (cas d'utilisation), les limites de la méthode (les acteurs) et les relations entre les cas et les acteurs. Les acteurs représentés sur cette figure sont identifiés par les quatre classes suivantes :

- Qui est intéressé par un certain besoin ?

Le dirigeant a besoin de prendre une décision quant à l'évolution de son système de production.

- Où dans l'organisation la méthode est-elle utilisée ?

Elle est utilisée par le système décisionnel du système usinant : les centres de décision relatifs aux trois fonctions « Gérer les Ressources », « Gérer les Produits » et « Synchroniser ».

- Qui bénéficiera de l'utilisation de la méthode ?

Compte tenu de l'absence d'informations sur le nouveau procédé au sein du système de production, le dirigeant bénéficie des résultats de la méthode pour engager le projet de conception.

- Qui fournira à la méthode l'information, qui l'utilisera et la maintiendra ?

Les autres acteurs du système apportent des informations relatives au secteur industriel où se place le système.

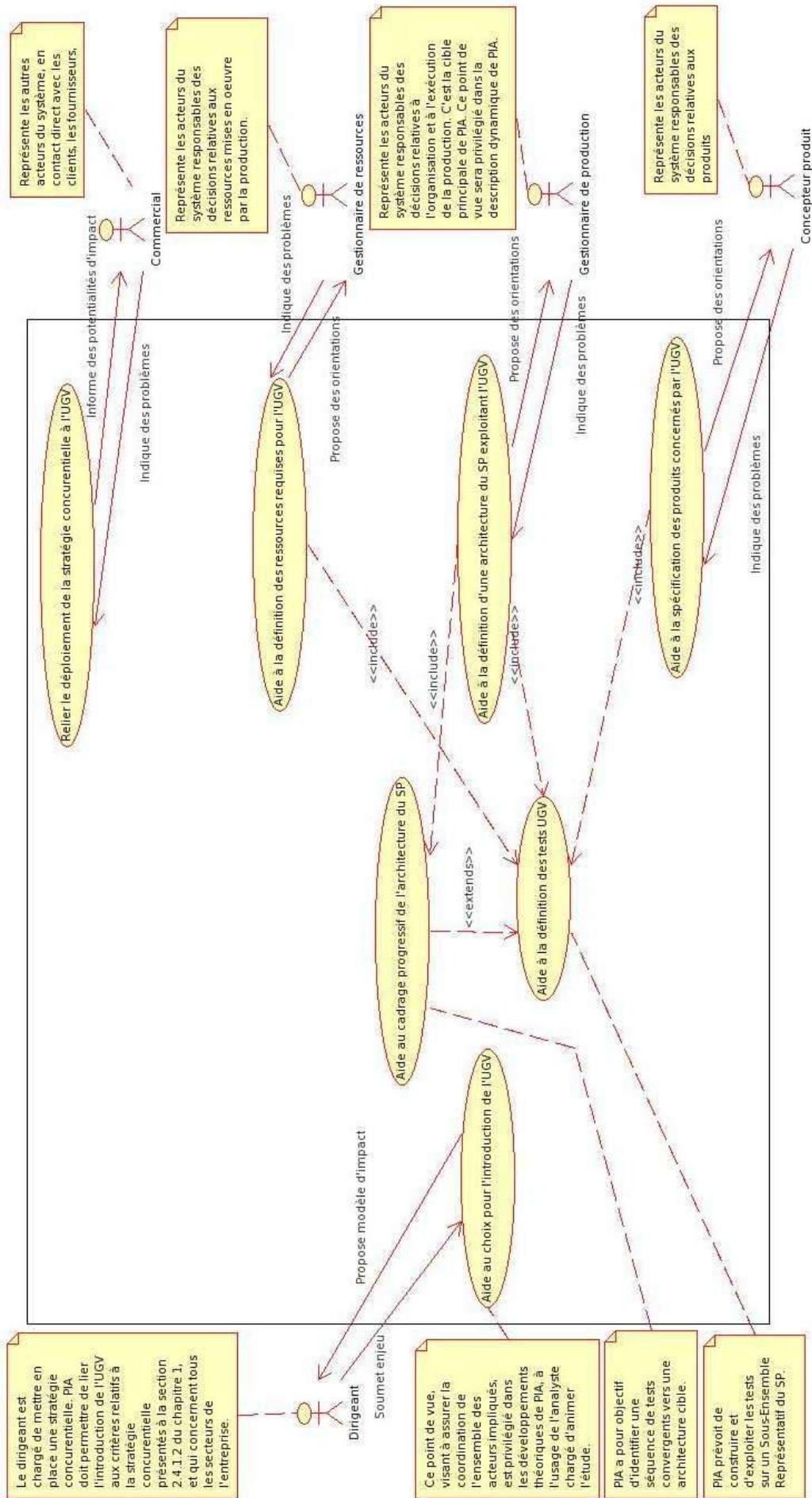


Figure 72 : Diagramme des cas d'utilisation de la méthode PIA (UML)

La démarche proposée, pour concevoir une architecture cible du système de production, à partir d'un travail sur les problèmes, se compose de quatre phases :

1. Conduite des interviews, puis reformulation des problèmes ;
2. Compréhension et explication des phénomènes, par formalisation des contradictions techniques ;
3. Identification d'un sous-ensemble représentatif du système de production, comme par exemple une pièce type, à partir de l'intensification des contradictions ;
4. Conception d'une architecture cible à partir d'architectures « extrêmes » issues du processus d'intensification, et d'analyses de faisabilité sur le sous-ensemble représentatif.

Pour chacune de ces phases, les différentes tâches à effectuer sont détaillées. Pour chacune d'elles, les objectifs, contraintes, variables d'action, connaissances nécessaires et critères d'évaluation sont proposés. L'étude menée chez Usocome illustre l'application concrète des étapes successives.

2.2) Phase 1 : Reformulation des problèmes

Après la phase d'initialisation, définissant le périmètre du système étudié et les personnels impliqués dans le projet, commence le processus de reformulation de l'expression initiale des problèmes. Il se compose des tâches suivantes :

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none">a) Initialisation de l'avant-projetb) Expression initiale des problèmesc) Classement initial des problèmesd) Validation des problèmes initiaux |
|---|

Ce processus résulte en la construction d'une représentation partagée des besoins, au niveau conceptuel. Pour y parvenir dans des délais et des coûts admissibles pour une phase aussi en amont d'un projet, les connaissances du système particulier sont analysées, au travers des connaissances de la classe de système (le modèle de problèmes et le Modèle des Systèmes Opérationnels de Production).

2.2.1) Initialisation (1a)

Cette tâche consiste tout d'abord à choisir les acteurs du projet, suivant les critères proposés par GRAI/GIM [Doumeingts 2001]. Ces acteurs sont répartis en cinq groupes :

- Le groupe de pilotage établit les objectifs du projet et oriente l'étude en fonction des résultats des différentes phases.
- Le groupe de synthèse est constitué des futurs utilisateurs du système et des principaux centres de décisions. Il apporte ses connaissances au projet, suit le déroulement de l'étude, et vérifie les résultats des différentes étapes.

- Le groupe d'analystes/spécialistes fournit les données nécessaires à la modélisation, à l'analyse et à la conception. Il aide à décrire les opérations réelles de l'entreprise.
- Le groupe des interviewés fournit les informations nécessaires.
- Le groupe de travail approfondit les pistes de solution à implémenter, pour la phase de conception.

Compte tenu de l'effectif de l'unité de production, du mode de gestion adopté sur le site (relative indépendance financière des unités de production), et de la décentralisation des bureaux des méthodes (tous les techniciens sont attachés à une seule et même unité de production), un seul groupe permet de réunir toutes les compétences nécessaires. Le groupe de travail est ainsi constitué :

- Du responsables des méthodes UP (Usine Production) ;
- Du responsable de l'unité de production PF1 (Production Fabrication 1) ;
- D'un technicien méthodes du secteur PF1 ;
- Du responsable du secteur usinage des carters ;
- D'un technicien méthodes du secteur usinage des carters ;

En conséquence, la pluridisciplinarité du groupe est principalement d'ordre technique. Chacun y possède en outre une vision des différents horizons stratégiques, organisationnels et opérationnels dans son propre domaine.

D'un commun accord avec le groupe ainsi constitué, le projet d'introduction de l'UGV se limite au secteur PF1. La conception des produits finis, faite en bureau d'études sur un site allemand du groupe, ainsi que celle des bruts ne pourront pas, dans le cadre de ce projet, être remises en cause. Elles ne sont par contre pas à exclure suivant les conclusions tirées. Il en est de même de la métrologie (point de vue contrôle des pièces) des références faites au sein du secteur PF1.

2.2.2) Expression initiale des problèmes (1b)

Elle consiste en une première interview des acteurs au sein du groupe de travail, à propos des problèmes rencontrés. Elle a pour but de mettre en évidence les contradictions avérées dans le système particulier. Celles-ci doivent être recherchées à tous les niveaux du système de production particulier traité.

Après une présentation de la démarche générale du diagnostic (approche par les contradictions et par les niveaux du système), les discussions commencent. Pour faciliter cette présentation, le chef de projet peut s'appuyer sur des représentations graphiques des outils utilisés, et les laisser à disposition des acteurs pendant les séances.

Les discussions une fois entamées peuvent se mener de deux manières, suivant les réactions des interlocuteurs :

- Sous forme libre en attendant l'expression spontanée de problèmes ;
- Sous forme dirigée, en se basant sur les questions types : « avez-vous des problèmes liés à un des six éléments de performance ou aux couple ressource-produit ? ». Par exemple, « avez-vous des problèmes d'état de surface ? Si oui sur quelle référence, ou sur quelle machine ? ». A ce niveau de l'interview, le niveau de précision des réponses peut ne pas être

satisfaisant. La suite de la démarche aide à améliorer ce niveau de précision.

Le résultat de cette tâche est un ensemble de problèmes initiaux.

Soit $P = \{pb_1, \dots, pb_i, \dots, pb_n\}$, l'ensemble de ces problèmes initiaux. Un premier classement est alors réalisé, uniquement sur la base de la fonction dégradée implicitement dans l'expression du problème (de qualité, de diversité ou, à première vue, d'ordre économique).

L'annexe U1 détaille les 21 problèmes initiaux recensés lors de cette interview. Elle formalise l'état initial de l'espace partagé de communication. Cette première interview met en évidence la diversité des problèmes auxquels sont confrontés les utilisateurs et responsables du système de production.

Analysons le problème (pb4) tel qu'il apparaît dans l'annexe U1 (encadré en trait fort), et rappelé dans la figure (73).

Pb4 Certaines machines en limite de capacité * Anticipation des dérives par fort autocontrôle et validation par laboratoire de métrologie * Déformations de certaines pièces pendant l'usinage * Pb de conception sur certaines références
--

Figure 73 : Extrait de l'annexe U1 (Pb4)

Il ressort de l'entretien que certaines machines atteignent les limites de leurs possibilités (par rapport aux spécifications demandées). La qualité des produits est la performance que les interviewés ont jugé la plus dégradée par l'état du système, pour cette classe de problème. Il n'est pas encore question, à ce stade, d'évoquer la précision ou les délais.

En présence des différents points de vue (apportés par les acteurs), des remèdes (de l'autocontrôle par exemple) aux effets de problème, ou des conséquences (pour le moment peu précises) sont exprimés pendant les discussions. La conception des pièces est elle-même remise en question. Tous ces éléments sont rapportés dans l'espace partagé, afin d'éviter des omissions et des répétitions, synonymes d'augmentation des délais de la tâche.

L'application a montré le foisonnement des idées, lors de la formulation des problèmes. La discussion est très fertile, et chacun se rend compte qu'il n'est pas le seul à subir des dysfonctionnements. Aussi, il est conseillé de ne pas focaliser le déroulement de cette première interview sur la rigueur du classement, mais plutôt sur l'exhaustivité des problèmes.

Il est à noter que les problèmes, référencés dans l'annexe U1, ne relèvent pas tous de dysfonctionnements de l'atelier. Au contraire, certains montrent que justement aucun dysfonctionnement n'est constaté sur une classe donnée. C'est le cas des problèmes référencés Pb10 et Pb16, concernant le niveau général des stocks de matières premières, et la variabilité des matériaux usinés.

2.2.3) Classement initial des problèmes (1c)

En fonction du critère de performance affecté, c'est à dire de la conséquence du problème, les problèmes initiaux subissent un classement. Cette tâche est faite

par l'analyste, en dehors du groupe de travail. Il peut être effectué directement lors de l'interview, en tâche précédente, selon la précision des réponses.

Cette tâche a pour résultat, la construction de couples [problèmes, éléments de performance], à partir d'une liste de problèmes.

Si $E = \{e_1, \dots, e_6\}$ est l'ensemble des 6 éléments de performances de référence, le travail réalisé à cette étape peut être formalisé par une fonction F_c :

$$F_c: \quad P \rightarrow P \times E$$

$$pb_i \rightarrow (pb_i, e_j) \quad (2.2.i)$$

Le terme « image du problème » est utilisé dans la suite du développement pour qualifier le résultat du traitement de la formulation d'un problème à une étape donnée, par une fonction de type reclassement.

Le résultat de cette étape peut être formalisé, comme présenté dans le tableau 23. Les références des problèmes utilisées pour la présentation de ces tableaux sont indépendantes de celles utilisées dans le cas industriel. Elles sont exploitées à titre d'exemples génériques, illustrant les traitements successifs potentiels effectués au cours de la démarche.

Fonction	Faire des produits de qualité		Assurer un retour sur investissement à long terme		Faire des produits divers	
	Précision	Délai	Inflow	Outflow	Flexibilité	Réactivité
Élément de performance						
Problèmes recueillis	Pb 1	Pb 2, Pb 3	Pb 4		Pb 5	Pb 6

Tableau 23 : Classement initial des problèmes

L'annexe U2 détaille ce classement et montre la première évolution de l'espace partagé de communication. Il s'agit d'une proposition de l'analyste, sur la base de la première discussion sur les problèmes.

Analysons l'évolution du problème (pb4) tel qu'il apparaît dans l'annexe U2 (encadré en trait fort) et rappelé dans la figure (74). L'élément de performance dégradé, au vu de la formulation initiale du problème Pb4, semble être la précision des produits.

Les valeurs des tolérances spécifiées deviennent tellement faibles, que les déformations des pièces entraînent, sur certaines références, une grande quantité de rebuts. Pour les limiter, des autocontrôles très stricts sont imposés aux opérateurs, de manière à observer très rapidement toute dérive. La limite de capabilité des machines est perçue comme une cause possible à ces défauts. De même, les valeurs des tolérances (donc la conception des pièces) sont mises en doute, et placées comme causes du problème.

<p>Fc(Pb4) Certaines machines en limite de capacité * Anticipation des dérives par fort autocontrôle et validation par laboratoire de métrologie * Déformations de certaines pièces pendant l'usinage * Pb de conception sur certaines références</p>

Figure 74 : Classement en précision du Pb4

Comme ce classement est réalisé en dehors du groupe de travail, aucune nouvelle information n'y figure, par rapport au résultat de la tâche (1b).

2.2.4) Validation des problèmes initiaux (1d)

Le résultat de la tâche précédente sert de support de discussion avec les acteurs du système de production, pour valider le lien problèmes initiaux / éléments de performance. Comme la tâche (1c) est effectuée en dehors du groupe de travail, elle doit être validée par les spécialistes de l'entreprise.

Il s'agit de vérifier, le temps d'une réunion avec le groupe de travail, que le choix proposé de classement entre deux éléments de performance d'une même fonction correspond bien au fonctionnement du système.

Pour chaque problème, lorsque la conséquence (donc l'élément de performance dégradé) n'est pas explicite, le questionnement suivant peut être posé : « qu'est ce qui vous gêne, au travers de ce problème ? :

- Est-ce le fait de produire avec du retard, ou de générer des rebuts ?
- Est-ce le nombre de pièces différentes où le temps de reconfiguration ?
- Est-ce son coût trop élevé ou le trop faible chiffre d'affaires généré ? »

Pour l'image du problème précédent, Fc(Pb4), rappelée sur la figure (74), les spécialistes ont confirmé que la performance dégradée était bien la précision, et non pas le délai de livraison des références concernées.

Ce type de confirmation marque la satisfaction des acteurs du projet vis-à-vis du travail effectué. Cette tâche, comme toute la première phase, ne peuvent être évaluées à ce niveau d'avancement que par une telle classe de critères. Tous les acteurs doivent réussir à communiquer leurs problèmes concernant le système, et à les intégrer dans l'espace partagé.

2.2.5) Synthèse de la phase 1

Cette synthèse regroupe des constatations issues du déroulement des deux premières interviews et du travail achevé par l'analyste extérieur.

Tout d'abord, les conditions pratiques de l'interview sont très importantes, pour son efficacité. Les interviewés peuvent être déroutés par la formulation des questions. La concrétisation de la construction progressive de l'espace partagé de communication est un moyen efficace de faire progresser le groupe. En table ronde, le principe des contradictions (sous forme graphique) est présent à la vue de tous les membres du groupe. Chacun peut ainsi assister à la construction du modèle de l'existant (sous la forme de problèmes), et s'approprier progressivement les raisonnements.

C'est pourquoi, la complémentarité des acteurs, en termes de connaissances de leur système de production, permet d'obtenir les différents points de vue que l'approche globale proposée requiert. En cas de blocage lors de la discussion, pour préserver cette complémentarité, le chef de projet doit pouvoir réagir sur des domaines non abordés.

Le fait de questionner sur des éléments non exprimés par les membres du groupe a un double objectif :

- Éviter des omissions ou un blocage sur une certaine catégorie de problèmes, en ouvrant la discussion à un sujet connexe au précédent ;
- Ne pas placer la discussion uniquement que sur les dysfonctionnements de l'atelier. Les Pb10 et Pb16 et leurs images successives, montrant de bons fonctionnements de l'atelier, illustrent cette proposition.

La concrétisation de l'espace partagé et le questionnement sont les deux ressources qui permettent d'améliorer cette phase du processus.

2.3) Phase 2 : Formalisation des contradictions techniques

Après le diagnostic global des conséquences des problèmes, la détermination des causes des dysfonctionnements identifiés mène à la formulation des besoins. Les acteurs impliqués sont identiques à la première phase, pour garantir la cohérence des points de vue et la connaissance du système. La phase 2 se compose de deux tâches :

- e) Localisation des causes de problème
- f) Consolidation des formulations

La phase 2 ne peut être clôturée que lorsque toutes les causes des problèmes ont été validées.

2.3.1) Localisation des causes du problème (2e)

Cette étape s'attache à identifier les causes des problèmes, en les exprimant plus finement à un des quatre niveaux du modèle générique du système de production retenu. Elle est effectuée par l'analyste en dehors du groupe de travail.

Si $N = \{n_1, \dots, n_4\}$ est l'ensemble des 4 niveaux de référence, le travail réalisé à cette étape par l'analyste, peut être formalisé par une fonction F_e :

$$F_e: \quad P X E \rightarrow P X E X N$$

$$\quad (pb_i, e_j) \rightarrow (pb_i, e_j, n_k) \quad (2.3.i)$$

Le résultat est formalisé dans le tableau 24.

Fonction	Faire des produits de qualité		Assurer un retour sur investissement à long terme		Faire des produits divers		
	Élément de performance	Précision	Délai	Inflow	Outflow	Flexibilité	Réactivité
Lot			Pb 3				Pb 6
Pièce				Pb 4			
Surface	Pb 1						
Matériau			Pb 2			Pb 5	

Tableau 24 : Résultat de la localisation des problèmes

L'information permettant le classement est la ressource ou le produit auxquels le problème fait référence. Voici le détail des sous-ensembles décrivant la fonction F_e .

- Un problème de coupe ou de lubrification est classé au niveau 1 ;
- Un problème lié au porte-outil, au niveau 2 ;
- Un problème lié au montage d'usinage, au niveau 3 ;
- Un problème lié à la machine-outil, au niveau 4.

A ces critères s'ajoutent les définitions des critères de précision des produits donnés au chapitre 1 (cf. tableaux 2 et 3, p.60 et 61), et celles relatives à la flexibilité et à la réactivité (cf. chapitre 3, §3.2.1.2.c).

L'annexe U3 montre l'évolution de l'analyse, et donc de l'espace partagé de communication, menée chez Usocom à cet état de l'avancement de la démarche.

<p>Fe(Fc(Pb4))(3) Certaines machines en limite de capacité * Pb de conception sur certaines références</p>	<p>Fe(Fc(Pb4))(2) Certaines machines en limite de capacité * Anticipation des dérives par fort autocontrôle et validation par laboratoire de métrologie</p>	<p>Fe(Fc(Pb5)) Travail par familles de pièces * Mêmes méthodes mais grande hétérogénéité des dimensions * Montages deviennent inadaptés pour grandes pièces (déformations)</p>
--	---	---

Figure 75 : Décomposition du Pb4 tirée de l'annexe U3

Poursuivons le traitement du problème initial, référencé Pb4, commencé en phase 1b. Son reclassement suivant les niveaux du système est présenté sur la figure (75). Le problème initial, relatif à la limite de capacité de certaines machines, a été divisé en trois (encadrés en traits forts sur l'annexe) :

- L'image de problème Fe(Fc(Pb4))(3) est reclassée au niveau 3, la « pièce » apparaissant dans l'énoncé. Elle est placée à ce niveau, faute d'informations plus précises concernant le matériau, les surfaces ou la géométrie impliqués. Ce type de formulation attend des éléments complémentaires si la précision du classement ne satisfait pas les spécialistes. C'est le but de la prochaine tâche (2f).

- L'image de problème Fe(Fc(Pb4))(2) est reclassée au niveau 2. En effet, seuls des autocontrôles de type mesure dimensionnelle sont effectués dans l'atelier. Les surfaces de certaines références de l'atelier sont ainsi affectées par ce problème.
- L'image de problème Fe(Fc(Pb4))(1) formulée initialement comme « Déformation de certaines pièces pendant l'usinage » a disparu. Elle est en fait intégrée à Fe(Fc(Pb5)) qui concerne, comme le montre la figure (75), certains montages inadaptés à de grandes pièces. Les formulations des deux images étaient identiques, des points de vue du couple [Produit-Ressource] et du critère de précision sur le produit. Cette proposition de classement demande également à être confirmée par les spécialistes de l'atelier.

Pour ce type de tâches, effectuées à l'extérieur du groupe de travail, aucune connaissance supplémentaire du système particulier ne peut être apportée. Elles constituent une confrontation des connaissances du système particulier et de la connaissance générale de la classe de système. L'évaluation du travail alors mené est directement opérée par les autres membres du groupe à la prochaine ; la durée de la validation ou de la consolidation atteste de la pertinence des reclassements.

2.3.2) Consolidation des formulations (2f)

Cette étape a pour objectif de lever tout doute subsistant sur l'expression et le classement des problèmes. La robustesse du diagnostic de l'état initial du système de production en dépend.

Elle se déroule à nouveau sous forme d'interview des spécialistes, et peut conduire à reclasser des problèmes. Cette interview doit traiter tous les problèmes de façon exhaustive. En prenant comme base de travail concrète l'espace partagé de communication, les reclassements sont cette fois-ci effectués au sein même du groupe. Chaque spécialiste peut ainsi valider directement, par les connaissances de son domaine, la forme finale de l'espace partagé.

Le travail réalisé à cette étape par l'analyste et le groupe de travail, peut être formalisé par une fonction F_f :

$$F_f: \quad P X E \rightarrow P X E X N$$

$$\quad (pb_i, e_j) \rightarrow (pb_i, e_j, n_k) \quad (2.3.ii)$$

Les annexes U4 et U5 représentent l'espace partagé de communication à la fin de cette tâche. Des extraits en sont tirés illustrant les divers reclassements. Trois types de reclassement, définissant la fonction F_f sont envisageables :

- Remettre en cause le niveau d'impact d'un problème. Il est important d'identifier correctement ce niveau pour orienter le choix du sous-ensemble représentatif. Le tableau 25 illustre le type de modification envisageable.

Qualité		Retour d'investissement		Diversité	
Précision	Délai	Inflow	Outflow	Flexibilité	Réactivité
	Pb 3				
	Pb 3				

Tableau 25 : Modification de la localisation du problème

L'extrait de l'annexe U5, montré sur la figure (76) (et encadré en trait fort sur l'annexe), illustre ce type de reclassement. En phase (2e), ce problème avait été classé au deuxième niveau (cf. figure (75)). En interrogeant le groupe, l'information de la non maîtrise de certaines des caractéristiques du matériau usiné s'est ajoutée. Cet événement autorise de décliner ce problème également au niveau 1.

Ff(Fe_Fc_Pb4_(2))(1) Maîtrise difficile de l'usure due aux variations de matériaux

Figure 76 : Extrait de l'annexe U4 (traitement de Pb4)

Les deux autres problèmes, illustrés sur la figure (75), n'ont pas subi de reclassement

- S'assurer que le problème est bien relatif à un élément de performance donné, et non pas à celui avec lequel il est potentiellement en contradiction. Dans ce cas, le reclassement ne peut se faire qu'au sein d'une même contradiction d'évolution. Le tableau 26 illustre ce type de reclassement.

Qualité		Retour d'investissement		Diversité	
Précision	Délai	Inflow	Outflow	Flexibilité	Réactivité
				Pb 6	Pb 6

Tableau 26 : Assurance de la performance dégradée

Aucun exemple de ce type de reclassement a du être opéré lors de l'étude au sein du secteur PF1 d'Usocome.

- Si la formulation est relative à la contradiction d'évolution financière, il faut essayer dans la mesure du possible de trouver sa cause technique potentielle (cf. tableau 27), en la recherchant dans les deux autres contradictions d'évolution. Cela va réduire le champs des solutions possibles.

Qualité		Retour d'investissement		Diversité	
Précision	Délai	Inflow	Outflow	Flexibilité	Réactivité
			Pb 4		
					Pb 4

Tableau 27 : Correspondance technique d'un problème économique

Le tableau 28, montre un exemple où trois problèmes différents sont reliés à la même ressource. La raison du problème économique trouve plusieurs correspondances dans les catégories techniques.

	Élément 4 PRECISION	Élément 2 OUTFLOWS	Élément 5 FLEXIBILITE
N 1	Ff(Fe_Fc_P6) Pb de maîtrise du lubrifiant * Pas d'universel pour l'instant * Stabilité des bains, retraitement, boues avec la fonte	Ff(Fe_Fc_Pb12) Cout du retraitement des lubrifiants	Ff(Fe_Fc_Pb17) Aimerait un lubrifiant universel pour fonte et aluminium

Tableau 28 : Extrait de l'annexe U4 concernant les problèmes de lubrification

Au cours de l'étude du secteur PF1, aucun exemple de problème d'ordre économique, dont le reclassement en cause technique a été directement possible, n'a été évoqué. Ainsi, les causes techniques des problèmes Pb 7 (valeur ajoutée trop faible) et Pb9 (faibles volumes pour pièces de faible valeur ajoutée) n'ont pas été déterminées. Le besoin à satisfaire est néanmoins exprimé sous une forme exploitable : les bruts de certaines références, où les consommables, sont trop chers pour les volumes de production respectifs.

2.3.3) Synthèse de la Phase 2

Le résultat de cette phase exprime l'ensemble des besoins à satisfaire, pour éliminer les dysfonctionnements constatés dans l'atelier. Comme certains bons fonctionnements ont été eux aussi recensés, ils constituent une référence pour la suite de l'avant-projet. Toute solution à implanter ne doit pas dégrader ces secteurs positifs du système.

Le diagnostic du secteur de production PF1 d'Usocom a permis de formuler 21 problèmes initiaux. Après les deux premières phases, leur reformulation a conduit à l'expression de 27 « image de problèmes », dont :

- Deux images de problèmes qui sont en fait des bons fonctionnements : stabilité des classes de matériaux (image de Pb16), et l'absence de problèmes de stocks (image de Pb7).

- Seuls les problèmes initiaux Pb3 et Pb4 ont dû subir des opérations de reclassement supplémentaires, par rapport aux tâches 1b (classement par les fonctions), 1c (classement par les performances) et 2e (classement par les produit-ressource). Les tâches de validation (1d) et de consolidation (2f) ont généré six images supplémentaires de ces deux problèmes initiaux. Cela montre à la fois la criticité de ces deux problèmes, et justifie les validations successives des reclassements.

D'un point de vue mise en œuvre de la démarche, ces deux phases ont été effectuées en trois réunions de deux heures, avec le groupe de travail. La constitution du groupe n'a jamais dû être remise en cause, ni le périmètre d'étude.

Comme le montre l'évolution de la quantité et de la précision des informations sur l'espace partagé de communication, les spécialistes s'approprient peu à peu les raisonnements tenus (sur la base des contradictions). La conceptualisation des dysfonctionnements opérationnels et organisationnels s'effectue de plus en plus facilement.

Ce mécanisme est renforcé par la concrétisation de l'espace partagé de communication. Chaque membre du groupe peut en permanence s'approprier les types de reclassement et vérifier par lui-même la justesse des informations apportées. Nous faisons l'hypothèse fondamentale que la connaissance de chacun de l'ensemble des problèmes (par l'espace partagé), exprimés et reclassés, assure la robustesse de la méthode. La robustesse se caractérise, pour notre approche, par l'absence de tout nouveau problème au cours de l'avant-projet. Un tel problème n'est ni reformulable, ni classable de la même manière d'aucun autre, exprimé précédemment.

2.4) Phase 3 : Détermination d'un sous-ensemble représentatif

Pour ne pas disperser l'énergie déployée à la conception de l'architecture cible du système de production, nous souhaitons déterminer un sous-ensemble représentatif du système de production. Il s'agit en général du sous-système de production associé à un ou plusieurs produits (extrant du système). Ce sous-ensemble permet de matérialiser :

- La localisation spatiale des problèmes essentiels :
Ce sont l'ensemble des ressources (les composants du système) concernées par ces problèmes.
- La localisation temporelle des problèmes essentiels :
Ce sont les produits concernés par ces mêmes problèmes.

Ces deux propositions sont issues de l'interprétation des interactions temporelles et interconnexions spatiales formalisées au cours du chapitre Deux.

Pour identifier ces deux localisations, les membres du groupe d'analyse sont interrogés, en intensifiant les contradictions repérées. Intensifier une contradiction demande d'imaginer l'effet néfaste du problème de manière amplifiée voire poussée à l'absurde.

Cette phase comprend deux tâches :

- g) Sélection des produits représentatifs
- h) Limitation du sous-ensemble représentatif

2.4.1) Sélection des produits représentatifs (3g)

Cette tâche utilise une interview des acteurs pour faire émerger des produits pour lesquels les contradictions seraient extrêmes. En d'autres termes, elle vise à identifier parmi les références réalisées dans l'atelier, quelles sont celles qui cumulent le maximum de difficultés, exprimées sous la forme de problèmes.

Par exemple, pour le Pb_1 illustré à l'étape (2e), les acteurs du système de production sont questionnés sur l'existence de produits comportant des surfaces dont la qualité est la plus éloignée des spécifications dimensionnelles exigées. Cette identification de produits représentatifs doit se faire en cohérence avec les hypothèses du modèle de problèmes. Cela se traduit par une recherche uniquement sur les critères de précision, en traitant indépendamment les problèmes de délais associés aux débits de produits (cadences de production exigées).

Ce type de raisonnement permet, a priori, d'identifier autant de produits différents que d'images de problèmes construites ; soit un produit par besoin formulé en fin de phase 2. Chaque membre du groupe de travail est invité à le mener, à partir des connaissances liées à son propre champ disciplinaire. La confrontation des différents avis des membres du groupe permet ensuite de restreindre potentiellement le nombre de produits représentatifs.

Sur l'étude de cas, l'image Fe(Fc(Pb5)) concernait des « Déformations de certaines pièces pendant l'usinage ». Pour cet exemple, la question suivante est posée à l'intégralité du groupe : « quelle est la pièce sur laquelle le respect de tolérances géométriques très petites (par rapport aux capacités des machines de l'atelier) est le plus difficile, compte tenu des délais de livraison exigés ? ».

2.4.2) Limitation du sous-ensemble représentatif (3h)

A la suite de l'étape (3g), il est possible de faire émerger un sous-ensemble représentatif de produits. Grâce aux connaissances du système particulier, un sous-ensemble représentatif du système de production lui est alors associé. Si cette sélection n'est pas évidente, des techniques de hiérarchisation comme le tri croisé peuvent être utilisées.

Comme la démarche est orientée sur l'introduction d'un nouveau procédé, nous proposons de ramener tous les produits représentatifs à la référence dont ils font partie.

De l'ensemble des problèmes reformulés et reclassés, les spécialistes du groupe de travail d'Usocome ont, à l'unanimité, extrait la référence HW30. Il s'agit d'un carter d'un renvoi d'angle. Le modèle géométrique de ce carter (modèle de la pièce finale et non du brut) est représenté sur la figure (77).

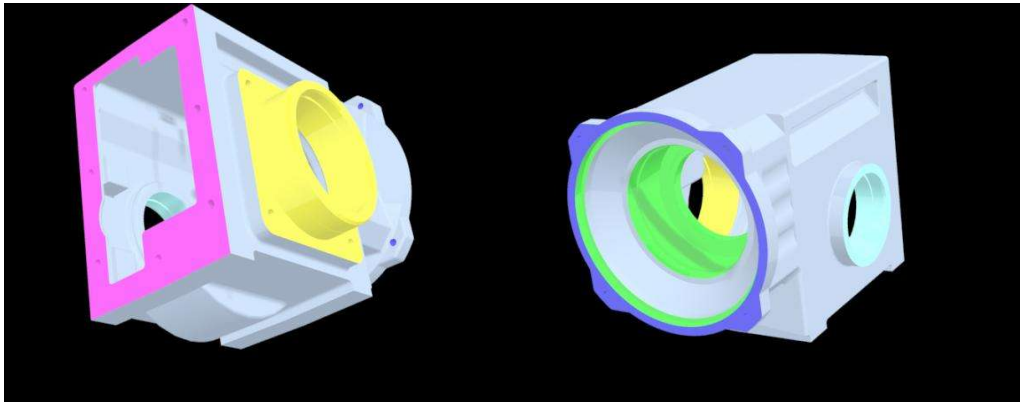


Figure 77 : Rendus de CAO du carter HW30

Les dessins de définition de cette référence et de son brut sont donnés en annexes U7 et U8. Le matériau est de la fonte à graphite lamellaire Ft 25 (FGL 250). Vue l'implantation du secteur de production en îlots produits, l'identification du sous-ensemble du système de production associé à cette référence ne peut prêter à ambiguïté. Le HW 30 est produit à raison de 200 à 600 pièces par mois (en un ou deux lots), sur un seul centre d'usinage 4 axes à broche horizontale (centre NBH). Une seule sous-phase d'usinage est nécessaire pour l'obtention du produit fini. Le dessin d'ensemble du montage d'usinage à deux postes est donné sur l'annexe U9. Le lavage est la seule autre phase effectuée dans l'atelier, avant son expédition.

Cette référence permet de synthétiser l'ensemble des problèmes à résoudre pour mieux faire correspondre les performances réelles de l'atelier, à celles exigées.

- Pour les délais :
 - Diminuer le temps consacré à la maintenance ;
 - Synchroniser les débits des différents postes pour éviter les goulots ;
- Pour la précision :
 - Diminuer le taux de rebuts
 - Améliorer la précision des pièces d'une même famille, en conservant ces méthodes d'usinage.
 - Maîtriser les variations dans les bruts (matériaux, surépaisseurs) ;
 - Maîtriser la lubrification et l'usure des arêtes de coupe.
- Pour la flexibilité :
 - Mettre en place des solutions permettant de s'adapter aux variations de tailles de lots ;
 - Mettre en place des solutions permettant d'intégrer efficacement un accroissement d'un nombre de références différentes ;
 - Mettre en place des solutions permettant de continuer la démarche de standardisation des gammes d'usinage ;
 - Diminuer le nombre d'outils spécifiques.
- Pour la réactivité :
 - Tenir compte dans le choix des solutions de l'absence de gestion des ressources, autres que celles du niveau 4 ;
 - Tenir compte dans le choix des solutions de la faible quantité d'activités menées hors site.

- Pour les Inflows :
 - Augmenter la valeur ajoutée sur les produits ;
 - Pouvoir assurer la production de plusieurs générations de références en parallèles.
- Pour les Outflows :
 - Pas de besoin de diminution identifié.

La détermination du sous-ensemble représentatif [référence-ressources] a été très rapide. Elle s'est réalisée dans la suite directe de la phase de consolidation, lors de la même réunion. Environ 6 heures du groupe de travail ont été nécessaires pour mener les trois premières phases. En se référant au cycle d'abstraction d'OTSM-TRIZ cela représente le passage du constat d'une situation initiale insatisfaisante (qualifiée par des éléments de performance) à l'entame de la construction de solutions générales (débouchant sur des architectures du système cible).

Le périmètre de l'étude n'a pas eu à être remis en cause, tout comme la composition du groupe de travail. Seules les ressources mises à disposition des acteurs (l'espace partagé de communication) ont du être adaptées à un tel mode de conception collaborative.

2.5) Phase 4 : Identification d'une architecture cible

Comme cela a été présenté au chapitre Deux, l'architecture cible d'un système de production est l'union des éléments d'architectures temporelles et spatiales, au sein desquelles se déroulent les processus et sous-processus.

Compte tenu de la complexité du système, le choix de l'architecture cible s'appuie sur deux hypothèses, restreignant le domaine d'étude :

- Limitation à un sous-ensemble représentatif [produit-ressources] ;
- Limitation à la résolution des problèmes reformulés.

Cette phase se compose des quatre tâches suivantes :

- i) Balisage du domaine de recherche d'architecture
- j) Consolidation du cahier des charges de l'architecture cible
- k) Conception de la (ou des) architecture(s) cible(s)
- l) Évaluation des performances de la (ou des) architecture(s)
- m) Sélection d'une architecture.

2.5.1) Balisage du domaine de recherche d'architecture (4i)

L'objectif de cette tâche est de définir les performances à satisfaire par le futur système, modélisé pour l'instant sous forme d'une architecture cible. L'analyste, en dehors du groupe de travail, traduit la situation actuelle en termes de performances dégradées ou satisfaisantes. Il en déduit des propositions de performances à viser. Puis, ces propositions, sous la forme d'architectures extrêmes, sont soumises au groupe de travail.

Soit m le nombre de contradictions mises en jeu dans un avant-projet. Chacun des 2^m éléments de performance impliqués dans ces contradictions peut prendre une valeur maximale et une valeur minimale, qu'on associera respectivement à une valeur logique « True » or « False ». On peut par conséquent générer 2^{2^m} cahier des charges théoriques d'architecture dites « extrêmes » en combinant les valeurs maximale et minimale des différents éléments de performance. Ces architectures « extrêmes » représentent le Résultat Idéal Final (RIF) du processus de conception. Ce concept de RIF a montré son efficacité appliqué dans de tels processus pour les systèmes de production (cf. chapitre Deux).

L'analyste peut classer ces cahiers des charges d'après leur intérêt en cinq catégories :

- Les cahiers des charges potentiels pour lesquels les deux éléments de performance d'une même contradiction prennent les valeurs « False », sont intrinsèquement inintéressants. Ceux-ci peuvent être abandonnés.
- Les cahiers des charges potentiels pour lesquels les deux éléments de performance d'une même contradiction prennent les valeurs « True » (ce qui de par la nature même de la contradiction est une difficulté considérable), et où il n'y a, d'après les connaissances du système déjà mises à jour, pas de technologie prête pour y satisfaire. Ceux-ci peuvent être abandonnés.
- Les cahiers des charges potentiels pour lesquels les deux éléments de performance de chacune des contradictions sont complémentaires, mais qui ne présentent pas d'intérêt, d'après les connaissances du système déjà mises à jour. Ce peut être le cas lorsqu'ils correspondent à la situation actuelle, ou à une situation ne correspondant pas à la stratégie de l'entreprise. Ils peuvent donc aussi être abandonnés.
- Les cahiers des charges potentiels pour lesquels les deux éléments de performance de chacune des contradictions sont complémentaires, et qui présentent un intérêt. Ceux-ci peuvent être développés en architecture.
- Les cahiers des charges potentiels pour lesquels les deux éléments de performance d'une même contradiction prennent les valeurs « True », et pour lesquels une piste de solution a été mise à jour. Il s'agit en général de l'introduction d'une technologie innovante. Ceux-ci peuvent être développés en architecture.

Le fait de restreindre l'étude à une seule référence exclut les activités du niveau 4 de la recherche d'architectures cibles. Dans un premier temps, l'implantation de l'atelier, et la planification de la production ne sont pas remises en cause. L'objectif intermédiaire est ainsi de valider (ou d'éliminer) le procédé aux trois premiers niveaux (enlèvement de matière, opération d'usinage, sous-phase d'usinage).

Concernant le secteur PF1, ce choix est d'autant plus autorisé, qu'aucun problème ni d'infrastructures (surface au sol, génie civil...), ni d'ordonnancement, n'a été diagnostiqué lors de la phase d'interviews des spécialistes du secteur.

Sur le tableau 29 figure la synthèse des états des performances. Un « 0 » y correspond à une valeur insatisfaisante de l'élément de performance pour PF1. Un « 1 » relate l'absence de dysfonctionnements, donc une performance acceptable.

	QUALITE			COUT			DIVERSITE				
	Délai	Précision		Inflow	Outflow		Flexibilité	Réactivité			
AQ1	0	0	Pas d'intérêt	AC1	0	0	Pas d'intérêt	AD1	0	0	Actuel
AQ2	1	0	Actuel	AC2	1	0	Pas d'intérêt	AD2	0	1	Possible
AQ3	1	1	Cible	AC3	1	1	Cible	AD3	1	1	Idéal
AQ4	0	1	Pas d'intérêt	AC4	0	1	Actuel	AD4	1	0	Possible

Tableau 29 : Synthèse des objectifs des architectures

Ainsi, la combinaison AQ2 modélise la situation actuelle du secteur pour la qualité des produits. Aux niveaux 1, 2 et 3 aucune image de problème de délai n'a été générée. Par contre, la précision des produits doit être améliorée. La combinaison AQ1 n'a aucun intérêt, puisqu'elle reviendrait à dégrader les délais, en conservant une mauvaise précision. De même, AQ4 dégraderait une situation satisfaisante pour les délais. Aussi, pour la qualité, il est recherché une amélioration de la précision, sans dégrader les délais(mais sans nécessairement les améliorer), modélisée par la combinaison AQ3 du tableau 29.

En tenant les mêmes raisonnements pour la diversité des produits, aucune des deux performances actuelles n'est satisfaisante. L'objectif idéal, modélisé par AD3, doit être visé, mais ne semble pas atteignable dans un premier temps. Un entretien supplémentaire avec les acteurs du groupe de travail est nécessaire pour choisir entre AD2 et AD4.

D'un point de vue économique, le secteur PF1 ne souffre pas de problèmes d'outflows, mais a pour objectif d'améliorer la valeur ajoutée de ses produits, leur volume étant stable. L'architecture cible devra tout de même viser une diminution des coûts des lubrifiants, de la quantité de rebuts, et des consommables (plaquettes de coupe).

Pour cette tâche, une approche globale des performances a été préférée à une décomposition par niveau. La distribution des images de problèmes concentrée sur trois classes de problèmes (précision, inflows, flexibilité) et de façon homogène sur les trois premiers niveaux l'autorise. Les délais du projet en auraient également pâti. Pour rester fixés sur les objectifs, l'introduction de l'UGV est un argument supplémentaire pour restreindre le périmètre d'investigation. Elle justifie notamment l'omission volontaire (dans un premier temps) des images de problèmes du niveau 4.

2.5.2) Consolidation du cahier des charges de l'architecture cible (4j)

A partir de la liste réduite des cahiers des charges extrêmes définie à l'étape (4i), l'analyste peut consolider et affiner le cahier des charges du système de production cible, avec les acteurs du système de production. S'il reste plusieurs cahiers des charges, plusieurs architectures doivent être conçues.

Les architectures A1 et A2 retenues à ce stade, en utilisant les notations du tableau 29, résultent des opérations suivantes :

$$A1=AQ3 \cap AC3 \cap AD2 \quad \text{et} \quad A2=AQ3 \cap AC3 \cap AD4 \quad (2.5.2.i)$$

Les acteurs du système de production sont alors interrogés sur la pertinence de ces deux orientations. Un autre projet est actuellement en cours dans le secteur PF1, concernant la gestion des outils de coupe. Il concourt à la résolution directe de l'image de problème Ff(Fe_Fc_Pb19). Aussi, l'amélioration de la réactivité n'est pas directement recherchée via l'introduction de l'UGV. L'architecture A1 est écartée, pour privilégier A2.

La connaissance du système particulier a été exploitée pour restreindre encore le domaine des solutions possibles. A cette tâche, se dessine la distinction nette entre l'architecture du système cible et l'architecture du système de production de la phase de tests. En effet, certaines inconnues demandent à être déterminées expérimentalement, compte tenu de la modélisation incomplète du procédé démontrée au chapitre Un. Cela concerne notamment la validation de la durée de vie des outils en usinage à sec, et le respect de la précision dimensionnelle sur de faibles tolérances, comme Ø72 J6 (cf. dessin de définition du HW30), obtenues par contournage.

La mise en œuvre des tests introduit des contraintes supplémentaires, principalement en terme de délais, que la tâche (4k) a pour objectif d'intégrer.

2.5.3) Conception de la (ou des) architecture(s) cible(s) (4k)

A partir des cahiers des charges restants, cette tâche a pour objectif de concevoir une architecture cible pour la phase de tests, à partir d'une étude technique. Lors de cette tâche les architectures réelles sont conçues à partir de raisonnements sur les architectures extrêmes. Néanmoins, l'étude est toujours restreinte au sous-ensemble représentatif du futur système de production.

Le cadre théorique, déduit du modèle de problèmes est d'abord présenté. L'application au carter HW30 est détaillée dans le second paragraphe. Les moyens (ressources techniques et personnels) proposés par la Plate-Forme Productive Alsace UGV sont mis à disposition :

- Équipements de production : un centre d'usinage 5 axes (modèle KX8 Five de la marque Huron) et ses périphériques, sur le site du LEGT Heinrich de Haguenau.
- Moyens de Conception et de Fabrication Assistées par Ordinateur et de simulation d'usinage de l'INSA de Strasbourg.

Comme la priorité a été donnée à la flexibilité et à la précision (hors aspects économiques), les architectures des composants sont privilégiées par rapport aux architectures temporelles. Ces dernières doivent tout de même permettre de respecter les délais des produits.

2.5.3.1) Architecture des ressources

Dans un cas général, l'architecture cible A du système de production est le résultat de l'opération :

$$A = AQ \cap AC \cap AD \quad (2.5.3.1.i)$$

Le tableau 30 liste la décomposition des architectures génériques possibles, pour satisfaire chacune des trois fonctions de référence et leurs relations avec les éléments de performance.

Architecture des fonctions	Architecture des performances	Relations
AQ : architecture du système assurant le respect de la qualité des produits	AD : architecture assurant un délai imposé	$AQ = AD \cap AP$
	AP : architecture assurant une précision imposée	
AC : architecture du système assurant le respect du retour sur Investissement à long terme	AI : architecture assurant des Inflows imposés	$AC = AI \cap AO$
	AO : architecture assurant des Outflows imposés	
AD : architecture du système assurant le respect de la diversité des produits	AF : architecture assurant la flexibilité des produits imposée	$AD = AF \cap AR$
	AR : architecture assurant la réactivité des produits imposée	

Tableau 30 : Description des architectures génériques

Compte tenu du déroulement de l'étude de cas, nous avons choisi de développer les architectures, assurant l'amélioration de la flexibilité des produits imposée. Aussi, ce cadre théorique est, dans l'état actuel de nos connaissances, présenté uniquement du point de vue Flexibilité.

La figure (78) rappelle la décomposition de l'élément de performance « Flexibilité ». En intensifiant la contradiction physique, les deux paramètres 5.1 et 5.2 prennent les valeurs suivantes, pour un niveau i et un produit k donnés :

- P5.1.h : la ressource peut être universelle (pour tout produit du système de production), notée R_{ik} universelle ;
- P5.1.b : la ressource peut être dédiée (à un produit donné du système de production), notée R_{ik} dédiée ;
- P5.2.h : la ressource peut être modulaire, notée R_{ik} modulaire ;
- P5.2.b : la ressource peut être monobloc, notée R_{ik} monobloc .

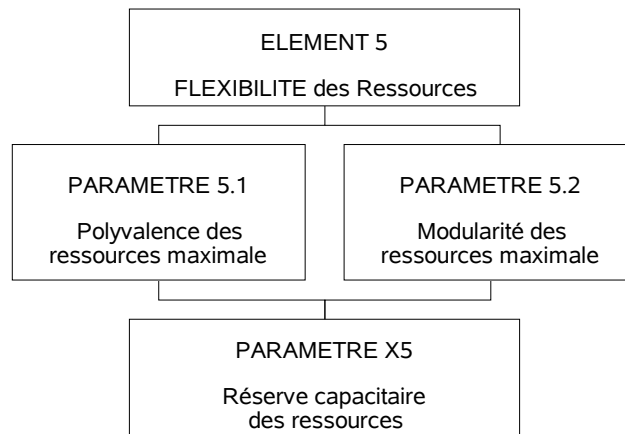


Figure 78 : Décomposition de l'élément de performance FLEXIBILITE

Pour un niveau i et un produit k donnés, l'architecture de la ressource (du point de vue flexibilité) peut se modéliser par l'ensemble AF_{ik} , tel que :

$$AF_{ik} = \{R_{ik} \text{ monobloc} ; R_{ik} \text{ modulaire}\} \cap \{R_{ik} \text{ universelle} ; R_{ik} \text{ dédiée}\} \quad (2.5.3.1.ii)$$

En vue d'assurer la flexibilité du système, certaines combinaisons peuvent être écartées. Les ressources [monobloc dédiée] et [modulaire universelle] n'ont pas de sens pratique. Les deux restantes se différencient par leur réserve capacitaire.

L'architecture complète AF du système, en vue d'assurer la flexibilité maximale, se déduit alors, par la relation :

$$AF = \left(\bigcup_{k=1}^{k=n_1} (AF_{1k}) \right) \cup \left(\bigcup_{k=1}^{k=n_2} (AF_{2k}) \right) \cup \left(\bigcup_{k=1}^{k=n_3} (AF_{3k}) \right) \cup \left(\bigcup_{k=1}^{k=n_4} (AF_{4k}) \right) \quad (2.5.3.1.iii)$$

où $n_i, \{i=1,2,3,4\}$ est le nombre de produits différents du niveau i .

Pour obtenir une flexibilité maximale, $2^{n_1+n_2+n_3+n_4}$ architectures extrêmes doivent être potentiellement examinées.

A l'heure actuelle, les architectures extrêmes génériques, correspondant aux autres éléments de performance, ne sont pas formalisées. C'est pourquoi, les relations (de type intersection) entre architectures, exposées dans le tableau 30, ayant pour objectif de restreindre le champ des solutions, ne peuvent pas être exploitées de la sorte.

Ce besoin de restriction, sur l'étude de cas, est obtenu par l'utilisation de règles « métier », issues de :

- Connaissances complémentaires propres aux spécialistes d'Usocome ;
- Connaissances générales du domaine de l'usinage, interprétées au travers des contradictions techniques.

2.5.3.2) Architecture cible du HW30

L'objectif de cette tâche est de définir les architectures cibles potentielles, que ni les connaissances générales du domaine de l'usinage, ni les connaissances particulières des spécialistes d'Usocome, ne permettent de hiérarchiser directement.

a) Interconnexions spatiales des ressources pour le HW30

Compte tenu des besoins identifiés précédemment, les architectures extrêmes, assurant un accroissement de la flexibilité servent de base à la construction des éléments d'architectures (du point de vue interconnexions spatiales) cibles des ressources.

L'annexe U6 montre une partie de l'arborescence des combinaisons possibles. Elle est développée en ne tenant pas compte du nombre de produits de chaque niveau.

Pour chaque élément de performance à améliorer, les choix opérés sont décrits. Les sélections successives permettent de passer de 256 architectures possibles à celle la plus adaptée à la validation de l'Usinage Grande Vitesse. Les sélections sont basées sur les critères suivants, issus de la re-formulation et du classement des problèmes :

- Diminution du nombre de porte-outils spécifiques : en exploitant des opérations de contournage plutôt que d'alésage, les fraises 2 tailles (outil universel) peuvent être utilisées pour plusieurs surfaces, plutôt que des têtes à aléser multi-plaquettes.
- Amélioration de la précision pour les surfaces et la géométrie. Cette contrainte se traduit par la minimisation du nombre de ressources par niveaux. Les ressources non assemblées (donc monobloc) sont ainsi privilégiées. Ce choix vise principalement à respecter les exigences d'équilibrage des ensembles outil – porte-outils, et limiter les risques de défauts dimensionnels dus à du battement sur l'ensemble [arête de coupe / porte-outil].
- Limitation des déformations en flexion des porte-outils, soit une maximisation du diamètre des outils de contournage, et la minimisation de leur porte-à-faux.
- Limitation des activités menées hors site. Les ressources modulaires, notamment les montages d'usinage, sont donc écartées dans un premier temps.
- Utilisation d'une fraiseuse 5 axes (non modulaire) pour la réalisation des tests.

Le tableau 31 présente l'architecture des composants (du point de vue interconnexions spatiales des ressources) proposée à la validation du groupe de travail.

Niveau	1		2		3		4	
	Modularité	Polyvalence	Modularité	Polyvalence	Modularité	Polyvalence	Modularité	Polyvalence
Paramètres de la flexibilité								
Architecture des ressources	Outil monobloc	Outil universel Nombre d'outils minimal	Porte-outil monobloc	Porte-Outil universel Nombre minimal de porte-outils	Montage d'usinage monobloc	Montage universel Nombre minimal de montages	Machine monobloc	Machine 5 axes. Nombre minimal de machines

Tableau 31 : Éléments d'architecture spatiale des composants

En confrontant cette première version aux spécialistes, deux critères se rajoutent pour cibler l'architecture :

- Une première version du montage d'usinage, ne comprenant qu'un seul poste, est encore disponible à PF1. Non utilisé en production, il peut être mis à disposition des tests. Comme la gamme d'usinage ne comprend qu'une seule sous-phase, le fait qu'il soit dédié n'est pas pénalisant. Sa mise en œuvre, permet également de limiter le coût des tests et en raccourcit le délai.
- Des fraises monoblocs ont déjà été testées à PF1. La plage de vitesses de coupe, possible avec cette classe d'outils, est plus faible que pour des outils à plaquettes (disponibilité des nuances). Aussi, les tests sont orientés sur la validation des outils à plaquettes.

La deuxième version, tenant compte des restrictions imposées par l'atelier, de l'architecture du système pour la phase de tests est proposée dans le tableau 32.

Niveau	1		2		3		4	
	Modularité	Polyvalence	Modularité	Polyvalence	Modularité	Polyvalence	Modularité	Polyvalence
Paramètres de la flexibilité								
Architecture des ressources	Outil à plaquettes	Outil universel Nombre d'outils minimal	Porte-outil monobloc	Porte-Outil universel Nombre minimal de porte-outils	Montage d'usinage monobloc	Montage dédié. Nombre indifférent de montages	Machine monobloc	Machine 5 axes. Nombre minimal de machines

Tableau 32 : Éléments d'architecture validés

b) Interactions temporelles du HW 30

Le modèle des systèmes opérationnels de production a mis en évidence les éléments d'architectures relatifs aux interactions temporelles :

- Plan de production (ET4+) :

Il n'est pas remis en cause car les tests se font à l'extérieur du système de production PF1.

- Gamme de fabrication (ET34) :

Elle n'est composée que d'une seule phase actuellement (sans compter le lavage). Une augmentation du nombre de phases ne répond à aucun des besoins identifiés.

- Les séquences d'usinage (ET23) et les trajectoires d'usinage (ET12) :

Ce sont les deux classes d'environnements à déterminer pour chaque couple [produit-ressource], en tenant compte de l'architecture proposée.

Le tableau 33 montre, pour chaque entité d'usinage, le nombre d'opérations envisagées. Ce résultat du travail, mené en collaboration avec les spécialistes d'Usocome, est issu des résultats d'analyse suivants :

- Les rainures de circlips sont déjà usinées par contournage. Ce sous-processus n'est pas modifié.
- Les chanfreins seront contournés. Cela permet d'améliorer la flexibilité de la ressource correspondante.
- Toutes les surfaces nominalement cylindriques (alésages et arbres), actuellement réalisées avec des têtes à aléser dédiées, peuvent être réalisées avec les mêmes porte-outils, en fraisage par contournage.
- Les surfaces nominalement planes, étant toutes intégralement accessibles avec une fraise deux tailles, peuvent être réalisés avec la même fraise que les alésages.
- Pour les taraudages (M5, M6 et M8), deux évolutions de processus sont envisagées : en utilisant un outil universel (fraise deux tailles monobloc de diamètre 4mm) pour l'avant-trou, ou en utilisant un outil dédié permettant de combiner les opérations de perçage et de taraudage dans un même cycle. Ce dernier choix est justifié par le fait que les forets actuellement employés pour les avant-trous ne le sont pas pour d'autres types de surfaces usinées dans le secteur PF1.

Entités	Groupes de surfaces	Opérations
Plans	PL1, PL2, PL3	Ébauche et Finition
Alésages	CYL1, CYL2, CYL4	Ébauche et Finition
Cylindres	CYL3	Ébauche et Finition
Rainures de circlips	CYL1, CYL2, CYL4	Finition
Chanfreins	CYL1, CYL2, CYL3, CYL4	Finition
Taraudages	TT1, TT2, TT3	Perçage, taraudage
		Contournage, taraudage
		Outils combinés

Tableau 33 : États intermédiaires pour chaque entité d'usinage

L'amélioration de la précision des surfaces et de la géométrie passe également par la minimisation des dispersions de remise en position des ressources lors de leurs activités de préparation et de transfert. La dispersion de remise en position des porte-outils de type HSK 63, est de l'ordre du micromètre ; celle du plateau du quatrième axe de la machine cumule le défaut de remise en position de la palette sur la table et la précision de l'axe B. Aussi, nous proposons de comparer l'ordonnancement actuel des opérations d'usinage, où le nombre de changements

d'outils est minimisé, à une version où le nombre de rotations du plateau est minimisé.

Cette proposition est justifiée par les évolutions apportées par l'UGV :

- Diminution des variations de températures de la pièce entre les opérations d'ébauches et de finitions ;
- Diminution des efforts de coupe (pour un débit volumique de matière constant).

Le plan d'action à mettre en place pour identifier l'architecture globale optimale est présenté dans le tableau 34. Les gammes 111, 133, 211 et 233 vont être testées pour lever les inconnues identifiées.

Surfaces	Types d'opérations des versions d'une même sous-phase							
	Fraise 2 tailles : opérations d'Ébauche de tous les groupes consécutives puis finitions consécutives				Fraise 2 tailles : opérations d'Ébauche et de finitions du même groupe consécutives			
Plans cylindres /	Fraise 2 tailles : opérations d'Ébauche de tous les groupes consécutives puis finitions consécutives				Fraise 2 tailles : opérations d'Ébauche et de finitions du même groupe consécutives			
Perçage	Foret (1)	Contournage (2)	Combiné, 2 mouvements (3) pour M6 et M8	Combiné, 1 seul mouvement (4)	Foret (1)	Contournage (2)	Combiné, 2 mouvements (3) pour M6 et M8	Combiné, 1 seul mouvement (4)
Taraudage	Taraud (1)	Taraud (1)			Taraud (1)	Taraud (1)		
Versions	111	121	133	144	211	221	233	234
Avis	Retenu	Éliminé	Retenu	Éliminé	Retenu	Éliminé	Retenu	Éliminé

Tableau 34 : Plan d'action pour la mise en place des tests

Les versions 121 et 221 ont été écartées car le fraisage par contournage des avant-trous des taraudages n'apporte pas d'intérêt spécifique. La fraise devrait avoir un diamètre de 4 mm, et une longueur suffisante pour réaliser les trois groupes de taraudages en M5, M6 et M8. Les M8 ayant une profondeur de 18 mm (plus de 4 fois le diamètre de la fraise), cette solution n'est pas retenue.

Les versions 144 et 234 ont été écartées compte tenu de l'insuffisante maîtrise de la commande des cycles de programmation nécessaires (pour la phase de tests) et de l'asservissement de l'électrobroche dans de telles conditions.

La figure (79) montre la gamme d'usinage se rapprochant le plus des architectures extrêmes envisagées. La réduction du nombre d'outils de près de 40% (de 18 à 11), et leur polyvalence assurée, est la matérialisation la plus flagrante des besoins formulés.

N°	Type d'opération	Nom de l'opération	Trajectoire	Groupe de surfaces	Type d'outil	Diamètre outil	N° outil	Valeur de B
1	Ébauche	Surfaçage	2D ½	PL1	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	0
4	Ébauche	Alésage	Hélicoïde	CYL2	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	0
4		Chanfrein 30	?	CYL2	?		4	0
4		Chanfrein 15	?	CYL2	?		2	0
5		Rainure Circlips	2D ½	CYL2	Fraise à circlips ép2,5	44	5	0
6		Perçage	Axiale	TT1	Foret	4,2	6	0
7		Taraudage	Axiale	TT1	Taraud M5	5	7	0
16	Finition	Alésage	Hélicoïde	CYL2	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	10	0
17	Finition	Surfaçage	2D ½	PL1	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	10	0
2	Ébauche	Alésage	Hélicoïde	CYL1	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	90
2	Ébauche	Dressage	2D ½	CYL1	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	90
2		Chanfrein 15	?	CYL1	?		2	90
3		Rainure Circlips	2D ½	CYL1	Fraise à circlips ép1,85	44	3	90
15	Finition	Alésage	Hélicoïde	CYL1	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	10	90
8	Ébauche	Dressage	2D ½	CYL3	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	270
8	Ébauche	Cylindrage	Hélicoïde	CYL3	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	270
9	Ébauche	Surfaçage	2D ½	PL2	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	270
10	Ébauche	Alésage	Hélicoïde	CYL4	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	270
8		Chanfrein 30	?	CYL3	?		4	270
10		Chanfrein 15	?	CYL4	?		2	270
11		Rainure Circlips	2D ½	CYL4	Fraise à circlips ép2,15	44	8	270
12		Perçage taraudage	Hélicoïde	TT2	Outil combiné M8		9	270
14	Finition	Surfaçage	2D ½	PL2	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	10	270
15	Finition	Cylindrage	Hélicoïde	CYL3	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	10	270
15	Finition	Alésage	Hélicoïde	CYL4	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	10	270
1	Ébauche	Surfaçage	2D ½	PL3	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	180
17	Finition	Surfaçage	2D ½	PL3	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	10	180
18		Perçage taraudage	Hélicoïde	TT3	Outil combiné M6		11	180

Figure 79 : Contrat de phase partiel (version 233)

Dans la colonne « N° », se trouvent les numéros des opérations classées dans l'ordre de la version actuellement en production. Un numéro apparaissant plusieurs fois relate la décomposition de groupes de surfaces obtenus avec des têtes à aléser multi-plaquettes.

Sur les annexes U10, U11 et U12 figure le détail des quatre versions de sous-phases retenues pour les tests physiques.

Pour compléter la préparation des tests physiques, des connaissances complémentaires sont nécessaires. L'appel à des experts extérieurs au groupe de travail participe à la finalisation de la conception de tests : choix des outils et des paramètres de coupe, adaptation du montage d'usinage, programmation du centre d'usinage (commandé par un directeur de Commande Numérique Siemens 840D).

2.5.4) Évaluation des performances de la (ou des) architecture(s) (4l)

Une phase de tests ou de simulation sur le sous-ensemble représentatif permet de quantifier les performances de la (ou des) architecture(s) conçues. Comme la phase 4 de la démarche se limite à la production d'un lot de la référence du sous-ensemble représentatif, seuls les éléments de performance de la fonction « faire des produits de qualité » peuvent être quantifiés. Aussi, l'objectif de cette tâche est de collecter toutes les informations, sur la qualité et le coût des pièces du lot, pour que les décisions stratégiques puissent être prises.

- Précision du lot de pièces :

La conception n'ayant pas été remise en cause, la métrologie dimensionnelle et géométrique des pièces de chaque version est prévue sur le site même de PF1. L'exploitation des procédures et matériels, connus des spécialistes, de l'atelier autorise les comparaisons des évolutions avec la production actuelle.

- Délai de fabrication des pièces :

Comme ni le montage d'usinage, ni la machine des tests ne seront utilisés dans l'architecture cible, seuls les délais des produits des niveaux 1 et 2 peuvent être évalués de façon réaliste. Ils résultent de simulations en CFAO des temps de cycle et de chronométrages pendant les tests.

- Bilan économique :

La complexité de la quantification absolue des coûts de l'introduction d'une nouvelle technologie a été démontrée au chapitre Deux. Aussi, pour réduire la quantité d'inducteurs de coûts et de leurs couplages, nous proposons de limiter cette étude aux inducteurs des niveaux 1 et 2. Le brut n'ayant pas été modifié, le bilan économique pour ces deux niveaux se résume à la comparaison des mises en condition et de l'exploitation des nouvelles arêtes de coupe (validation de la durée de vie), de la suppression de la lubrification et de l'utilisation des nouveaux porte-outils.

2.5.5) Sélection d'une architecture (4m)

L'objectif de cette tâche est de valider les résultats de l'avant-projet. Cela peut se traduire soit par la sélection d'une architecture cible, soit par le report du projet, si l'UGV ne peut répondre aux besoins. Les centres de décision du système de production ont pour tâche intermédiaire de comparer les couples [**valeurs des éléments de performance - variables du système de production (les paramètres Xi)**] entre le fonctionnement actuel du système et celui de l'architecture proposée.

La mise à disposition de toutes les informations nécessaires proposées en (4l) réunit toutes les conditions pour commencer un projet de développement de système de production. Selon les résultats de l'étude technique de faisabilité, plusieurs voies s'offrent au système décisionnel pour choisir l'architecture du système cible.

Si les conclusions sont positives, l'engagement dans le projet de développement dépend de la synchronisation des différents cycles de vie :

- Les cycles de vie de la nouvelle ressource et ceux des ressources en fonctionnement.
- Les cycles de vie de la nouvelle ressource et ceux des produits du système.

Ainsi, le nouveau sous-système (basé sur l'UGV) peut être substitué à un sous-système existant, ou venir en supplément. Il peut en outre être affecté à la réalisation de partie des produits existants ou réservé à tout nouveau produit.

Si les conclusions sont négatives, le projet peut être clos. L'étude sur le sous-ensemble représentatif montre en effet que l'UGV ne répond pas à l'ensemble des problèmes actuels. Par contre, il répond peut-être à certains des problèmes, lorsqu'il sont traités de façon indépendante. Dans ce cas, l'UGV peut à nouveau être envisagé si le système est confronté à une augmentation de la charge de production, ou d'introduction de nouveaux produits. La démarche peut être réitérée, en profitant des connaissances (sur la méthode et sur les technologies) déjà acquises.

2.6) Synthèse de la démarche d'introduction de l'UGV

2.6.1) Diagramme d'activités de PIA

D'après [OMG 2003], ce type de diagramme se concentre sur la formalisation des séquences et des conditions du concept modélisé ; ici, les caractéristiques de la méthode PIA. Il présente la vue dynamique de la méthode, autrement dit sa démarche d'application. Les états apparaissant sur le diagramme de la figure (80), sont des activités qui représentent des actions élémentaires à accomplir lors du déroulement de l'avant-projet.

Cette formalisation montre les trois catégories d'acteurs (les couloirs des responsables d'activité) de l'avant-projet : le groupe de pilotage, le groupe de travail et le groupe d'analystes extérieurs au système de production considéré.

Les trois principaux jalons apparaissent comme résultats des activités du groupe de synthèse : l'initialisation du projet, la consolidation du cahier des charges de l'architecture cible (du « système » de la phase de tests ou du système final), et la validation finale du résultat de la méthode (la spécification d'une architecture du système cible).

L'activité « choix du niveau d'investigation prioritaire », correspondant à la tâche (3g), est un nœud essentiel de la démarche générique. Le fait de devoir choisir le niveau d'investigation montre l'aspect non hiérarchique et non séquentiel de la cette démarche. Le niveau prioritaire dépend des problèmes de chaque système particulier. Les approches de type « top-down » ou « bottom-up » ne sont pas systématiques. Toute l'architecture du système cible est construite sur la base des images de problèmes à résoudre, par l'adaptativité de notre méthode.

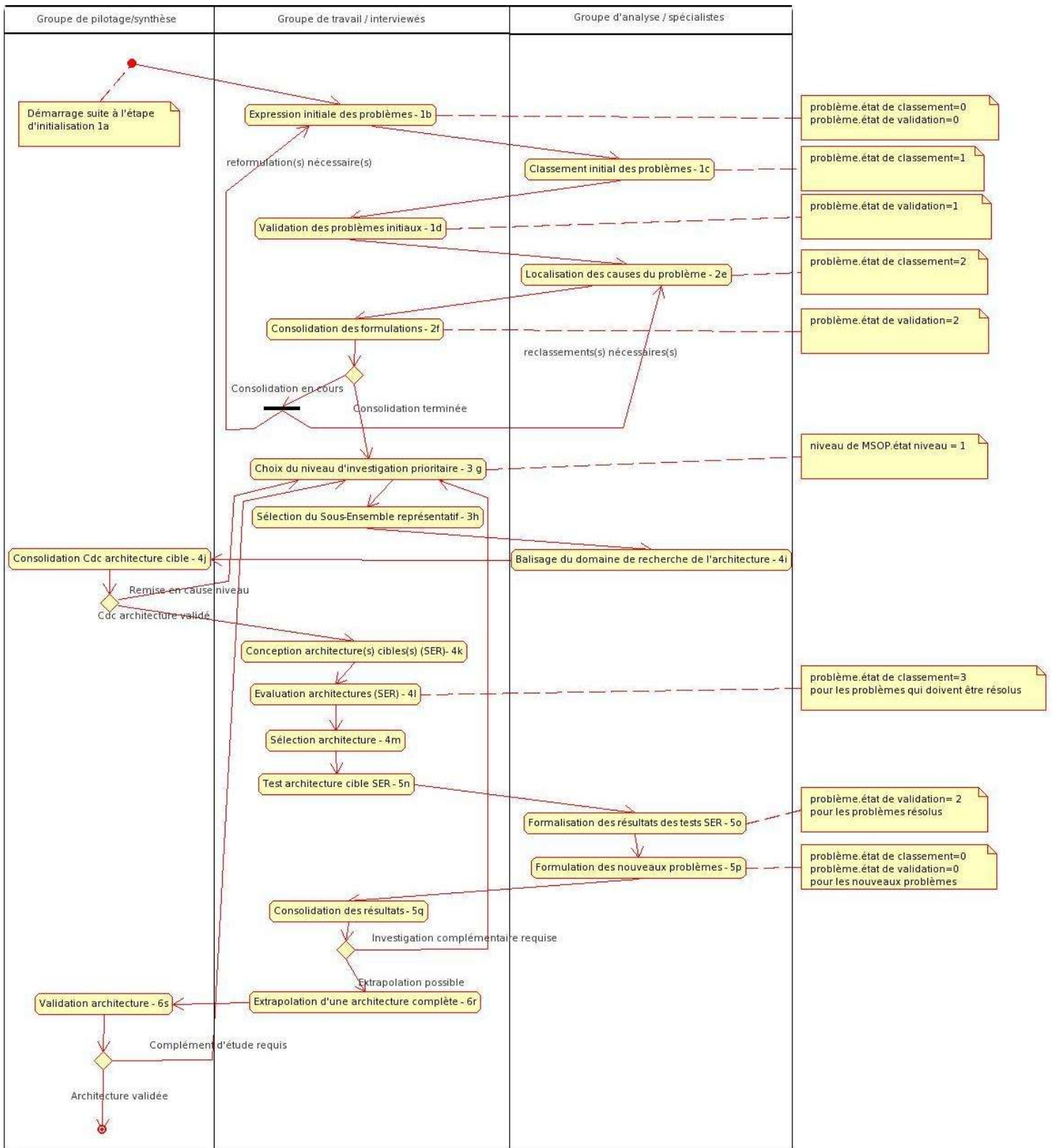


Figure 80 : Diagramme d'activités de la méthode PIA

2.6.2) Définition des phases 5 et 6

Le diagramme d'activités de la figure (80) introduit les tâches 5n à 6r (des phases 5 et 6). Au sortir des tâches expérimentales, il reste encore une part d'inconnu pour valider l'intégration de l'UGV et construire l'architecture du système cible. Elles portent sur les trois domaines suivants.

a) Comportement du système au niveau 3.

La même approche (par les architectures extrêmes) peut être adoptée pour résoudre les problèmes relatifs à la mise en œuvre et l'exploitation des montages d'usinage. Les choix combinés de la structure des machines et de la conception des futurs montages d'usinage doivent tenir compte des inerties des masses en mouvements, si elles ont été négligées le système actuel.

b) Comportement du système au niveau 4.

Cet aspect n'est pas propre au procédé de transformation morphologique. C'est pourquoi, lors du développement de l'architecture, les techniques des disciplines de la gestion de production doivent être identifiées en fonction des problèmes reformulés.

c) Technologie des composants de la machine.

Les machines UGV intègrent de nouvelles technologies de composants (électrobroches, moteurs d'axes linéaires). Il a été démontré au premier chapitre le peu de données disponibles sur leur fiabilité. Cette lacune peut être la source de nouveaux problèmes dans le système particulier. Nous proposons, pour anticiper ces dysfonctionnements potentiels, de les prendre en compte dès la phase de développement. Ces propositions s'articulent autour des six couples $[E_i, X_i]$, et leurs prises en compte restent ensuite du ressort des centres décisionnels stratégiques :

- Sur le plan économique :

En prévoyant des outflows supplémentaires (en paramètre de fonctionnement) pour la maintenance des centres d'usinage. Cela se traduit sur le saut technologique, par une séparation des évolutions du process de production et de la technologie des composants. Dans ce cas, le passage à l'UGV s'appuie d'abord sur des technologies éprouvées (vis à billes, électrobroche à roulements hybrides...). Une fois la maîtrise du process acquise, les investissements se reportent sur les évolutions des technologies de composants.

- Sur les délais :

En sur-dimensionnant le sous-système, par rapport aux valeurs exigées pour les produits. L'architecture cible doit autoriser des activités de surveillance et de préparation des ressources plus importantes (en temps et coûts) que dans le système actuel. Cela se traduit par une stabilité sur le débit de produits.

- Sur la précision :

Les défaillances des composants n'ont pas d'incidences directes sur la précision des composants. Néanmoins, en acquérant les connaissances particulières manquantes pour déterminer leurs causes, à partir du suivi des composants, les environnements temporels peuvent être adaptés pour éviter l'apparition des

défaillances. Cela se traduit par une amélioration de la maîtrise des ressources du système.

- Sur la Flexibilité :

En augmentant la réserve capacitaire de tous les composants, leur exploitation, lors des transformations morphologiques, les placent loin de leurs limites. Cela facilite leur surveillance.

- Sur la Réactivité :

Pour diminuer le temps total consacré à la maintenance, l'augmentation des activités de préparation hors site est nécessaire. Cela se traduit par le suivi des ressources et donc leur gestion.

3) Validation de la méthode

Une première validation des paramètres temporels du modèle de problèmes est proposée. Ils sont comparés à ceux d'un modèle issu de la norme [CNOMO 2001]. La robustesse de la méthode (modèles et démarche) est ensuite évaluée sur l'étude de cas. Enfin, une proposition d'amélioration de la mise en œuvre de la démarche est formulée, via la quantification des problèmes.

3.1) Validation industrielle partielle du modèle de problèmes

L'annexe (V1) présente la correspondance entre les temps d'état issus de la norme [CNOMO 2001] et les paramètres temporels du modèle de problèmes. Elle a pour objet de définir « la logique de construction de la performance physique d'une installation et la sélection des indicateurs permettant la meilleure caractérisation possible pour tous les acteurs mis à contribution, et pour les principales phases du cycle de vie ». Sur cette annexe figurent dans la partie gauche du tableau, les grandeurs quantitatives de la norme, et des causes possibles de leur apparition dans le cycle de vie du système. A droite, y correspondent les paramètres temporels, rappelés ci-après, des éléments de performance Délais et Réactivité.

- Temps de transformation formant le paramètre 3.1.
- Les composants des paramètres 3.2 et 6.1 et 6.2 :
 - Temps de mise en condition
 - sur site:
 - prévisible (lancement, préparation, transfert, contrôle et surveillance et maintenance préventive)
 - non prévisible (maintenance curative)
 - hors site :
 - prévisible
 - non prévisible
 - Arrêts :
 - prévisible
 - non prévisible

Les temps d'état Temps de Bon Fonctionnement (TBF), Temps d'arrêt Fonctionnel (TAF), et temps indisponible (TI) ne traduisent pas les effets de défaillances potentielles des activités du système de production, contrairement aux

autres. Ainsi, tous les temps d'état ont une correspondance parmi les composants des paramètres du modèle de problèmes, excepté le Temps Potentiel Disponible (TPD) non lié au processus de production.

Parallèlement aux temps d'états, des exemples de correspondance des causes des défaillances ou fonctionnements normaux sont exposés. Ce sont des causes de second niveau. Toutes les défaillances recensées ont pour origine des défauts dus à un dysfonctionnement de l'activité de transformation morphologique. Lorsque ce défaut a lui-même une cause émanant d'une défaillance d'une autre activité du processus, cette cause est dite de second niveau.

Par exemple, une défaillance de la préparation d'un outil peut entraîner un bris de l'outil, non détecté par l'activité de surveillance de la machine pendant la transformation. Le temps de panne TP induit correspond à un temps de mise en condition sur site non prévisible. La cause de second niveau est donc un défaut de la surveillance de la ressource ; le troisième niveau serait le défaut de la préparation.

3.2) Validation de la démarche par l'étude de cas Usocome

Six réunions du groupe de travail, de deux heures chacune, ont eu lieu entre les mois d'avril et de septembre 2004. Les tâches (1a) à (4k) de la démarche ont été effectuées durant cet intervalle de temps. Quatre personnes en moyenne, employées d'Usocome, et deux intervenants externes ont donc été mobilisées 12 heures chacune. A terme, le temps passé effectivement en groupe de travail ne semble pas véritablement compressible. Par contre, le délai global de l'avant-projet peut être considérablement réduit.

L'étude en est à la mise en place des tests de simulation et d'usinage du carter HW30. Selon les résultats des différents tests (l'évaluation des quatre architectures), le groupe de travail aura encore pour tâche de planifier l'évolution du secteur PF1. L'utilisation de la vision multi-écrans d'OTSM-TRIZ a montré son efficacité dans ce contexte d'application (cf. chapitre Deux).

A l'heure actuelle, il n'est pas encore possible de juger la méthode dans son intégralité, en termes de satisfaction du client (secteur PF1 d'Usocome). Sa robustesse peut tout de même être soulignée. La méthode PIA s'appuie sur l'hypothèse fondamentale que la mise à disposition, de chaque membre du groupe de travail, de l'ensemble des problèmes (par l'espace partagé) assurait la robustesse de la méthode. Lors de l'application de la méthode chez Usocome, aucun nouveau problème n'est apparu. Le périmètre d'étude ainsi que les membres du groupe de travail sont restés identiques tout au long de l'étude.

Pourtant, la discussion dans le groupe de travail a toujours été ouverte à ces trois éventualités. Les besoins, exprimés au sortir de la deuxième phase de la démarche, n'ont pas eu à être remis en cause, ou complétés par de nouveaux dysfonctionnements à résoudre.

3.3) Quantification d'indicateurs de performance

Les contradictions relient les performances du système à des paramètres de conception et des variables du système de production. Toute la méthode PIA s'appuie essentiellement sur les perceptions qualitatives, qu'ont les centres des trois niveaux décisionnels, du système physique. Elles sont exprimées lors d'interviews et leur reformulation permet de construire des architectures cible du système.

Notre approche, basée sur les problèmes, nécessite que le groupe de travail soit composé d'intervenants ayant une connaissance suffisamment précise du système de production, pour en exprimer les dysfonctionnements. Ils apparaissent alors sous la forme de problèmes, et sont reformulés par la technique des contradictions. PIA est donc dépendante de la perception qu'ont les membres du groupe de travail de leur atelier. Par voie de conséquence, elle est adaptée à des projets dont l'ampleur est limitée par la composition du groupe de travail.

Pour améliorer encore la robustesse et appliquer la méthode à d'autres projets, nous proposons la définition d'indicateurs de performance directement issus du modèle de problèmes. Ils ont pour objectif de mesurer comment chaque fonction de référence du système de production est remplie.

- L'accomplissement de la fonction « faire des produits de qualité » se mesure par le rapport entre la précision d'un produit et son délai de fabrication. Soit Q_i cet indicateur de performance. La relation (3.3.i) introduit le principe de quantification de cet indicateur. P_i est la mesure de la précision des produits du ième niveau et T_i celle de leur délai de fabrication.

$$Q_i = \frac{P_i}{T_i} \quad (3.3.i)$$

La définition mathématique complète de cette indicateur reste à définir. Dans [Terrier 2004], les auteurs introduisent l'indicateur $Cp_{0.01}$ qualifiant l'obtention de surfaces gauches par des machines à structure parallèle, en reliant sa précision et son délai d'obtention. Sa confrontation à notre approche figure parmi nos perspectives de recherche.

- L'accomplissement de la fonction « faire une diversité de produits » se mesure par le rapport entre la flexibilité d'une ressource et sa réactivité.

Au chapitre Trois, il a été démontré que ce rapport pour les ressources d'un niveau donné était défini par la relation (3.3.ii), où \overline{Tmc}_i est le temps moyen de mise en condition des ressources du niveau i. Soit D_i cet indicateur de performance.

$$D_i = \frac{F_i}{R_i} = \frac{1}{\overline{Tmc}_i} \quad (3.3.ii)$$

- L'accomplissement de la fonction « Assurer un Retour sur Investissement à long terme » se mesure par le rapport entre les Inflows et les Outflows du système.

Ces trois classes d'indicateurs permettent de connaître un système particulier. Leur mesure, en fonction des valeurs des variables associées (les paramètres Xi), a pour objectif de donner les informations nécessaires, pour décider d'agir sur les variables avant que les problèmes apparaissent.

Ces indicateurs, étant basés sur le modèle de problèmes, sont déclinables théoriquement à chaque niveau du système de production. Ce sont donc potentiellement douze indicateurs qui sont ainsi définis.

Conclusion et perspectives

L'introduction de l'UGV dans un système de production a été replacée dans le contexte élargi de la problématique de l'évolution d'un système opérationnel de production. Notre approche est destinée à assister les dirigeants d'ateliers d'usinage dans leurs prises de décision. La méthode de conception proposée se veut générique pour l'ensemble du domaine de l'usinage. Elle complète les approches existantes du domaine, principalement orientées vers l'optimisation du procédé d'usinage.

La méthode de conception, intitulée PIA (Problem Integrated Approach), résultat global de ce travail de recherche, exploite des modèles originaux (le Modèle des Systèmes Opérationnels de Production, MSOP, et le modèle de problèmes) au cours d'une démarche d'application en phase d'avant projet, respectant un nouveau cycle d'abstraction.

Le Modèle des Systèmes Opérationnels de Production (MSOP) présenté au premier chapitre est le premier résultat de nos travaux. A partir de la compréhension des phénomènes physiques, issus de l'analyse bibliographique, de l'identification des classes de technologies mises en œuvre, les systèmes usinants ont été modélisés par ce modèle à caractère fractal. Il s'appuie sur la transposition de la première loi d'évolution des systèmes techniques, proposée par la théorie TRIZ, à quatre sous-systèmes interdépendants du système de production.

Ces sous-systèmes ont été identifiés, structurés suivant les triplets respectifs [processus ; produit ; ressource] et classés suivant quatre niveaux. Au premier niveau, l'enlèvement de matière se caractérise par la transformation du matériau, sous l'action d'une arête de coupe. Au second niveau, une opération se caractérise par la transformation d'une surface sous l'action d'un porte-outil. Au troisième niveau, une sous-phase se définit par l'utilisation d'un montage d'usinage pour transformer une pièce. Enfin, au quatrième niveau, une phase est définie par l'emploi d'une machine-outil pour transformer un lot.

L'aspect hiérarchique de ce modèle a permis de placer les différents sous-processus dans leurs environnements temporels et spatiaux respectifs. Les quatre sous-systèmes ainsi modélisés proposent en fait quatre vues complémentaires d'un même système de production. La hiérarchie apparente du formalisme, exploitée pendant les phases d'analyse, laisse place à un traitement non hiérarchique et non séquentiel des vues du système, lors de la construction des architectures.

Aussi, les choix stratégiques ne sont pas forcément guidés suivant une approche « top-down » des composants d'un système de production. Lors de la construction des architectures, le choix des caractéristiques des outils de coupe peut être prépondérant sur le choix des machines à implanter. L'introduction de l'UGV nous en apporte une démonstration flagrante. La validation (ou la non validation) des performances des ressources du premier niveau (notamment sur la durée de vie des outils) autorise, ou non, la poursuite du projet d'implantation.

La complexité des systèmes de production et de leur conception a été mise en évidence au deuxième chapitre. Pour faire face à cette complexité, le modèle de problèmes a été construit, à partir des principes d'OTSM-TRIZ. L'apport de cette théorie se situe principalement sur l'introduction de la notion de performance, parmi

les concepts fondamentaux des phases d'abstraction des processus de conception (les fonctions, les paramètres et les variables du système). Les problèmes des concepteurs du système sont modélisés sous la forme de contradictions d'évolution, contradictions techniques et contradictions physiques. Le modèle de problèmes, résultat principal du troisième chapitre, en est la synthèse.

Ce modèle a pour fondement technique les diagrammes « cause-effet », présentés à la fin du deuxième chapitre. Ils sont construits en explicitant les solutions techniques génériques des activités du MSOP, au cours des phases de son cycle de vie. Un cadre générique du domaine de l'usinage est ainsi proposé pour la formalisation des solutions techniques du domaine, sous la forme d'inducteurs de coûts.

L'identification de trois finalités du système de production, la Qualité des produits, la Diversité de la production et son Retour sur Investissement à long terme, a abouti à la définition de six éléments de performance : la Précision des produits, leur Délai de fabrication ; la Flexibilité des ressources, leur Réactivité ; les Inflows et Outflows du système de production.

La mise en relation de ces six éléments avec leur variable respective introduit une vision de l'UGV, complémentaire à celles basées sur la caractérisation des processus de transformation morphologique. La déclinaison de toutes les contradictions à tous les niveaux permet d'exprimer, de façon générique, 24 couples [élément de performance – variable du système]. La limite principale de cette approche est son fondement dialectique qui implique des raisonnements restreints à des couples de paramètres.

Ces deux premiers modèles sont intégrés à un cycle d'abstraction, introduisant la notion d'architecture des ressources, et une démarche d'application. Le cycle d'abstraction a été introduit au cours du chapitre Trois et la démarche d'application développée dans le chapitre Quatre. Les pratiques de la conception intégrée ont été transposées aux phases amont des projets d'introduction de l'UGV. La phase de conceptualisation du processus s'appuie alors sur un espace partagé de communication, issu du modèle de problèmes.

Cet ensemble constitue notre proposition de méthode conception, pour les phases d'avant-projet, des systèmes de production utilisant le procédé d'Usinage Grande Vitesse. La méthode, nommée PIA, est une réponse à la nécessité d'une approche globale (technique, organisationnelle et managériale) et générique pour le domaine de l'usinage. Son objectif, la définition d'une architecture du système particulier, doit assurer, au cours de la phase de projet proprement dite, la cohérence entre les points de vue stratégique, organisationnel et opérationnel des différents domaines impliqués. Elle permet d'introduire des éléments concrets de solutions générales dans les phases amont des projet. Elle utilise explicitement les connaissances liées au procédé de transformation.

Lors de ces phases amonts, la communication des différents champs disciplinaires est basée sur une discussion, autour des problèmes que les différents centres de décision subissent dans le fonctionnement du système. La reformulation des problèmes est le résultat du diagnostic du système particulier. Elle permet de formuler les besoins de l'industriel. Elle sert également de base pour le processus de construction de l'architecture du système cible, par l'intermédiaire de raisonnements sur des architectures extrêmes. Cette méthode apporte :

- La robustesse de la définition des besoins à assouvir ;
- La structuration des choix de ressources, au sein de leurs environnements temporels et spatiaux ;
- La conception de tests pour compléter l'étude de faisabilité technico-économique des architectures possibles.

Au travers de l'étude de cas, menée dans un secteur de fabrication de SEW-Usocom, la méthode s'est avérée adaptative au système particulier. Les acteurs du groupe de travail se sont appropriés les nouveaux raisonnements en quelques séances de travail. A partir du travail sur un sous-ensemble représentatif, quatre architectures cibles ont été conçues, pour la phase de tests. La préparation des tests, sur un carter de renvoi d'angle en fonte, est en cours. Ces tests ont pour objectif d'identifier les dernières inconnues liées à l'introduction de l'UGV.

Le niveau de généralité du modèle des systèmes opérationnels de production peut être éprouvé et étendu. Notre volonté est de transposer PIA à la conception de tout système de production. Dans un premier temps, nous allons chercher à démontrer dans quelle mesure l'approche [processus – ressource – produit] et la modélisation des problèmes généraux sont applicables à d'autres classes de transformations morphologiques. La modélisation des procédés de transformation des matières plastiques et la modélisation des lignes d'assemblage représentent les perspectives les plus directes, contribuant à cet objectif.

Dans un second temps, la démonstration de la généralité des modèles passe par la modélisation complète des éléments d'architectures. En effet, la construction de l'ensemble des éléments d'architectures possibles n'a pas encore été effectuée. Pour ce faire, le principe des architectures extrêmes, appliqué pour l'instant au besoin de Flexibilité, sera transposé aux cinq autres éléments de performance.

Pour conserver l'efficacité de la méthode, la formalisation de l'ensemble des architectures nécessiterait, à moyen terme, la construction d'un outil informatique. Son utilité est, d'une part, d'assister les acteurs du processus de conception dans la représentation de l'espace partagé de communication. La visualisation du processus de conception des ressources permettrait aux acteurs d'écarter plus rapidement des architectures qui ne correspondent pas à leur besoin. D'autre part, il offrirait alors un cadre de capitalisation des solutions particulières dans le domaine de l'usinage, voire indépendamment du procédé utilisé. Ainsi, sur les architectures retenues, il serait possible de cibler les connaissances nécessaires pour la validation du cahier des charges plus rapidement. La modélisation en UML des cas d'utilisation présentée dans ce mémoire, des vues statique et dynamique de PIA, contribue au développement du futur logiciel dédié à l'application de la méthode.

Dans la même logique de généralisation de PIA à la conception de systèmes de production, la théorie des coûts de transactions, introduite successivement par les économistes R. Coase dans [Coase 1937], puis plus récemment Williamson, dans [Williams 1992], semble proposer une voie de recherche prometteuse.

Un des fondements de cette théorie énonce qu'une forme d'organisation économique est efficace lorsqu'elle minimise les coûts de fonctionnement. Ces coûts de fonctionnement sont appelés coûts de transaction, puisque l'unité d'analyse est la transaction. Williamson précise un peu plus la notion de coûts de transaction que Coase. Il distingue ainsi les coûts de transaction ex ante (les coûts de négociation, les coûts de rédaction...) des coûts de transaction ex post (les coûts de mauvaise

adaptation, les coûts d'organisation et de fonctionnement associés aux structures de gouvernance auxquelles les parties s'adressent en cas de conflit,...). L'objectif est de parvenir à trouver une structure de pilotage des transactions qui minimise à la fois les coûts de transaction et les coûts de production. De tels concepts devraient compléter notre approche, pour apporter des éléments de réponse à une vision élargie de l'évolution d'un système de production, partie de l'entreprise. Des solutions, comme l'externalisation ou la délocalisation d'une partie de la production, peuvent alors être considérées en tant qu'alternatives possibles de l'évolution du système. Les théories afférentes sont des pistes d'investigation.

A plus long terme, l'analyse de cas d'étude peut être menée dans l'objectif de la formalisation des interactions entre les différents centres de décision du système de production lors des phases d'avant-projet. L'approche des modèles de GRAI peut nous permettre d'explicitier les influences réciproques entre les décisions des centres des trois niveaux opérationnel, organisationnel et stratégique et les liens informationnels. L'objectif recherché est d'optimiser le pilotage des connaissances lors de la démarche d'application de PIA, à l'échelle de l'entreprise. La transposition de la méthode PIA à l'évolution des systèmes de conception de systèmes de production, devrait contribuer à affirmer la cohérence globale de l'approche par les problèmes.

Bibliographie

- [Alam 2000]** Alam M. R., Lee K. S., Rahman M., Zhang Y. F., Automated process planning for the manufacture of sliders, *Computers in Industry*, Issue. 3, vol. 43, Pages 249-262, (2000)
- [Altintas 2000]** Altintas Y., *Manufacturing Automation*, Ed. Cambridge University Press, (2000)
- [Arnaud 2002]** Arnaud L., Dessein G., Application de la théorie des lobes de stabilité au fraisage de parois minces, *IDMME 2002*, Clermont-Ferrand, (2002)
- [Austin 2002]** Austin S., Newton A., Steele J., Waskett P., Modelling and managing project complexity, *International Journal of Project Management*, Issue. 3, vol. 20, Pages 191-198, (2002)
- [Barczak 1991]** Barczak G., Wilemon D., Communications patterns of new product development team leaders, *IEEE Transactions on Engineering Management*, Issue. 2, vol. 38, Pages 101-109, (1991)
- [Ben-Arieh 2003]** Ben-Arieh D., Qian L., Activity-based cost management for design and development stage, *International Journal of Production Economics*, Issue. 2, vol. 83, Pages 169-183, (2003)
- [Bengtsson 2002]** Bengtsson J., Olhager J., Valuation of product-mix flexibility using real options, *International Journal of Production Economics*, Issue. 1, vol. 78, Pages 13-28, (2002)
- [Berio 1999]** Berio G., Vernadat F. B., New developments in enterprise modelling using CIMOSA, *Computers in Industry*, Issue. 2-3, vol. 40, Pages 99-114, (1999)
- [Berrah 2001]** Berrah L., Clivillé V., Harzallah M., Haurat A., Vernadat F., *PETRA : un guide méthodologique pour une démarche de réorganisation industrielle*, Ed. LLP et LGIPM, (2001)
- [Berrah 2003]** Berrah L., Clivillé V., Vernadat F., Pilotage d'un processus de réorganisation : problématique de mise en place des indicateurs de performance, *Congrès de Génie Industriel*, Québec, (2003)
- [Besnouin 2002]** Besnouin M., L'atelier d'usinage flexible de culasses à la Française de Mécanique - Douvrin, Deuxièmes assises "Machines et Usinage Grande Vitesse", Lille, (2002)
- [Blanchard 2004]** Blanchard N., Rabany T., Duc E., Lobes de stabilité en UGV, Approche expérimentale en usinage de poches, *Assises MO&UGV*, Clermont-Ferrand, (2004)
- [Blundell 1982]** Blundell A. J., *Bond Graphs for Modelling Engineering Systems*, Ed. Halsted Press, New York, (1982)
- [Bokhorst 2002]** Bokhorst J. A. C., Slomp J., Suresh N. C., An integrated model for part-operation allocation and investments in CNC technology, *International Journal of Production Economics*, Issue. 3, vol. 75, Pages 267-285, (2002)
- [Bonney 2000]** Bonney M., Head M., Ratchev S., Moualek I., A manufacturing system design framework for computer aided industrial engineering, *International Journal of Production Research*, Issue. 17 SPEC., vol. 38, Pages 4317-4327, (2000)
- [Bourdet 1990]** Bourdet P., Villeneuve F., *La gamme automatique en usinage GROUPE GAMA*, Ed. Hermès, (1990)
- [Brissaud 2000]** Brissaud D., Tichkiewitch S., Innovation and manufacturability analysis in an integrated design context, *Computers in Industry*, Issue. 2, vol. 43, Pages 111-121, (2000)

- [Burns 2002]** Burns T. J., Davies M. A., On repeated adiabatic shear band formation during high-speed machining, *International Journal of Plasticity*, Issue. 1, vol. 18, Pages 487–506, (2002)
- [Cavalucci 1999]** Cavalucci, Contribution à la conception de nouveaux systèmes mécaniques par intégration méthodologique, Thèse de l'Université Louis Pasteur Strasbourg I, (1999)
- [Cay 1997]** Cay F., Chassapis C., An IT view on perspectives of computer aided process planning research, *Computers in Industry*, Issue. 3, vol. 34, Pages 307-337, (1997)
- [Chen 1997]** Chen D., Vallespir B., Doumeingts G., GRAI integrated methodology and its mapping onto generic enterprise reference architecture and methodology, *Computers in Industry*, Issue. 2-3, vol. 33, Pages 387-394, (1997)
- [CNOMO 2001]** CNOMO, E41.50.505. : Temps d'état et indicateurs de suivi de performances des moyens de production, Ed. CNOMO, (2001)
- [Coase 1937]** Coase R., *The Nature of the Firm*, Ed. Economica, (1937)
- [Cochran 2000]** Cochran D., Eversheim W., Kubin G., Sesterhenn M. L., The application of axiomatic Design and lean management principles in the scope of production system segmentation, *International Journal of Production Research*, Issue. 6, vol. 38, Pages 1377-1397, (2000)
- [Collignon 1997]** Collignon E., *Qualité*, Encyclopédie de Gestion, Issue. 3, vol. 3, Pages 2781-2793, (1997)
- [Colosimo 2002]** Colosimo B. M., Poggi A., Tolio T., The tooling system configuration in a new manufacturing system architecture, *International Journal of Production Research*, Issue. 15, vol. 40, Pages 3779-3790, (2002)
- [Cus 2001]** Cus F., Balic J., Selection of cutting conditions and tool flow in flexible manufacturing system, *Journal of Materials Processing Technology*, Issue. 1-3, vol. 118, Pages 485-489, (2001)
- [Dagiloke 1995]** Dagiloke I. F., Kaldos A., Douglas S., Mills B., High-speed machining: An approach to process analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, Issue. 1-4, vol. 54, Pages 82-87, (1995)
- [Dahlen 1996]** Dahlen P., Bolmsjo G. S., Life-cycle cost analysis of the labor factor, *International Journal of Production Economics*, Issue. /, vol. 46-47, Pages 459-467, (1996)
- [Dawson 2002]** Dawson T., *Machining hardened steel with polycrystalline cubic boron nitride cutting tools*, Thèse du Georgia Institute of Technology, (2002)
- [De Souza 2003]** De Souza A. M., Sales J. F., Ezugwu E. O., Bonney J., Machado A. R., Burr formation in face milling of cast iron with different milling cutter systems., *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers -- Part B -- Engineering Manufacture*, (2003),3
- [Deshayes 2003]** Deshayes L., Dartigues C., Ghodous P., Rigal J. F., Collaborative System for Cutting Data Management Based on STEP Standard, *Concurrent Engineering*, Issue. 1, vol. 11, Pages 27-36, (2003)
- [Dolinsek 2001]** Dolinsek S., Sustarsic B., Kopac J., Wear mechanisms of cutting tools in high-speed cutting processes, *Wear*, Issue. 1-12, vol. 250, Pages 349-356, (2001)
- [Dougmeints 1984]** Dougmeints G., Méthode GRAI: méthode de conception des systèmes en productique., Thèse de l'Université de Bordeaux I, (1984)
- [Doumeingts 2000]** Doumeingts G., Ducq Y., Vallespir B., Kleinhans S., Production management and enterprise modelling, *Computers in Industry*, Issue. 2-3, vol. 42, Pages 245-263, (2000)
- [Doumeingts 2001]** Doumeingts G., Ducq Y., Enterprise modelling techniques to improve efficiency of enterprises, *Production Planning & Control*, Issue. 2, vol. 12, Pages 146-164, (2001)

- [Duc 1998]** Duc E., Usinage de formes gauches : contribution à l'amélioration de la qualité des trajectoires d'usinage, Thèse de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, (1998)
- [Ducq 2001]** Ducq Y., Vallespir B., Doumeingts G., Coherence analysis methods for production systems by performance aggregation, International Journal of Production Economics, Issue. 1, vol. 69, Pages 23-37, (2001)
- [Dugas 2003]** Dugas A., Lee J. J., Terrier M., Hascoet J. Y., Development of a machining simulator considering machine behaviour., Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers -- Part B -- Engineering Manufacture, Issue. 9, vol. 217, Pages 1333-1340, (2003)
- [Durairaj 2002]** Durairaj S. K., Ong S. K., Nee A. Y. C., Tan R. B. H., Evaluation of Life Cycle Cost Analysis Methodologies, Corporate Environmental Strategy, Issue. 1, vol. 9, Pages 30-39, (2002)
- [Ettlie 1997]** Ettlie J. E., Integrated design and new product success, Journal of Operations Management 15, Issue. -, vol. 15, Pages 33-55, (1997)
- [Eversheim 1997]** Eversheim W., Bochtler W., Grassler R., Kolscheid W., Simultaneous engineering approach to an integrated design and process planning, European Journal of Operational Research, Issue. 2, vol. 100, Pages 327-337, (1997)
- [Fallbohmer 2000]** Fallbohmer P., Rodriguez C. A., Ozel T., Altan T., High-speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing, Journal of Materials Processing Technology, Issue. 1, vol. 98, Pages 104-115, (2000)
- [Farhat 2003]** Farhat Z. N., Wear mechanism of CBN cutting tool during high-speed machining of mold steel, Materials Science and Engineering A, Issue. 1-2, vol. 361, Pages 100-110, (2003)
- [Feng 2000]** Feng H.-Y., Su N., Integrated tool path and feed rate optimization for the finishing machining of 3D plane surfaces, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Issue. 11, vol. 40, Pages 1557-1572, (2000)
- [Fiorini 2004]** Fiorini C., Ghassempouri M., Rech T., Usinage à Très Grande Vitesses : Uране SX 80000 tr/min, Assises MO&UGV, Clermont-Ferrand, (2004)
- [Fischer 2002]** Fischer X., Nadeau J.-P., Sebastian P., Joyot P., Inverted Integrated Design: constraint satisfaction for design support system, Mecanique & Industries, Issue. /, vol. 3, Pages 593-605, (2002)
- [Furet 2002]** Furet B., Garnier S., La lubrification en UGV : un maillon important de la maîtrise du procédé, Deuxièmes assises "Machines et Usinage Grande Vitesse", Lille, (2002)
- [Geiskopf 2004a]** Geiskopf F., Kiefer F., Caillaud E., Villeneuve F., Utilisation de la connaissance en UGV pour cadrer l'évolution d'un atelier, Assises MO&UGV, Clermont-Ferrand, (2004a)
- [Geiskopf 2004b]** Geiskopf F., Kiefer F., Caillaud E., Villeneuve F., Using knowledge of High Speed machining to Design a shopfloor, IDMME'04, Bath, (2004b)
- [Geiskopf 2004c]** Geiskopf F., Goepf V., Kiefer F., Caillaud E., Problem Integrated Approach (PIA) : An Integrated Design Method of Manufacturing Systems, International Journal of Production Research, Issue. /, vol. /, Pages /, soumise en juillet 2004, (2004c)
- [Giard 2003]** Giard V., Gestion de la production et des flux, Ed. Economica, (2003)
- [Girard 2004]** Girard P., Doumeingts G., Modelling the engineering design system to improve performance, Computers & Industrial Engineering, Issue. 1, vol. 46, Pages 43-67, (2004)
- [Goepf 2003]** Goepf V., Contribution à la définition de processus contingents en développement de systèmes d'information : Proposition d'une démarche orientée identification des problèmes-clés, Thèse de l'Université Nancy I, (2003)

- [Goldratt 1984]** Goldratt E. M., Cox J., Le but : un processus de progrès permanent, Ed. AFNOR, (1984)
- [Goldratt 1990]** Goldratt E. M., The Theory of Constraints, Ed. North River Press, (1990)
- [Grabowski 1999]** Grabowski H., Towards a Universal Design Theory, Integration of process Knowledge into Design Support, Ed. Kluwer Academic Publishers, (1999)
- [Greffioz 2004]** Greffioz A., L'Usinage à Grande Vitesse : problèmes vibratoires, exemples de simulation d'usinage et machine de nouvelle génération, Assises MO&UGV, Clermont-Ferrand, (2004)
- [Griffin 1992]** Griffin A., Hauser J. R., Pattern of communication among marketing, engineering and manufacturing: a comparison between two new products., Management Science, Issue. 3, vol. 38, Pages 360-373, (1992)
- [Gunasekaran 2002]** Gunasekaran A., Tirtiroglu E., Wolstencroft V., An investigation into the application of agile manufacturing in an aerospace company, Technovation, Issue. 7, vol. 22, Pages 405-415, (2002)
- [Haber 2003]** Haber R. E., Alique A., Intelligent process supervision for predicting tool wear in machining processes, Mechatronics, Issue. 8-9, vol. 13, Pages 825-849, (2003)
- [Hammer 1993]** Hammer M., Champy J., " Le Reengineering ", Ed. Dunod, , (1993)
- [Hannula 2002]** Hannula M., Total productivity measurement based on partial productivity ratios, International Journal of Production Economics, Issue. 1, vol. 78, Pages 57-67, (2002)
- [Harding 2003]** Harding J. A., Popplewell K., Cook D., Manufacturing system engineering moderator: An aid for multidiscipline project teams, International Journal of Production Research, Issue. 9, vol. 41, Pages 1973-1986, (2003)
- [HEC 1997]** HEC, STRATEGOR, Politique générale de l'entreprise, Ed. Dunod, (1997)
- [Hinde 1995]** Hinde C. J., Fletcher G. P., Problem-centered design in concurrent engineering, International Journal of Industrial Ergonomics, Issue. 4-6, vol. 16, Pages 383-389, (1995)
- [Hurtado 2002]** Hurtado J. F., Melkote S. N., A model for synthesis of the fixturing configuration in pin-array type flexible machining fixtures, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Issue. 7, vol. 42, Pages 837-849, (2002)
- [Insperger 2003]** Insperger T., Stepan G., Bayly P. V., Mann B. P., Multiple chatter frequencies in milling processes, Journal of Sound and Vibration, Issue. 2, vol. 262, Pages 333-345, (2003)
- [ISO 513 2004]** ISO 513, Classification et application des matériaux durs de coupe pour enlèvement de métal avec arêtes coupantes définies -- Définition des groupes principaux et des groupes d'application, Ed. ISO, (2004)
- [ISO 9000 2000]** ISO 9000, Quality management systems -- Fundamentals and vocabulary, Ed. ISO, (2000)
- [ISO TC 184 2002]** ISO TC 184, Entreprise intégrée -- Cadre de modélisation d'entreprise, Ed. ISO, (2002)
- [ISO/IEC 15288 2002]** ISO/IEC 15288, Ingénierie systèmes -- Processus de cycle de vie des systèmes, Ed. ISO, (2002)
- [Jack 2002]** Jack E. P., Raturi A., Sources of volume flexibility and their impact on performance, Journal of Operations Management, Issue. 5, vol. 20, Pages 519-548, (2002)

- [Jiang 2004]** Jiang R., Zhang W. J., Ji P., Selecting the best alternative based on life-cycle cost distributions of alternatives, *International Journal of Production Economics*, Issue. 1, vol. 89, Pages 69-75, (2004)
- [Johnson 2000]** Johnson G., Scholes H., *Stratégie*, Ed. Publi Union, (2000)
- [Juan 2003]** Juan H., Yu S. F., Lee B. Y., The optimal cutting-parameter selection of production cost in HSM for SKD61 tool steels, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Issue. 7, vol. 43, Pages 679-686, (2003)
- [Jurist 1999]** Jurist, International, Contract for the provision of services (Consultant), Ed. r French Ministry of the Economy, Finance and Industry - Directorate Legal Affairs, (1999)
- [Jurist 2003]** Jurist, International, Guide for drawing up international contracts on consulting engineering, Ed. United Nations Economic Commission for Europe, (2003)
- [Kang 2003]** Kang M. C., Park I.-W., Kim K. H., Performance evaluation of AIP-TiAlN coated tool for high speed machining, *Surface and Coatings Technology*, Issue. 1, vol. 163-164, Pages 734-738, (2003)
- [Khomenko 2002]** Khomenko N., Kucharavy D., OTSM-TRIZ Problem solving process: Solutions and their classification, *Etria World Conference - TRIZ Future 2002*, Strasbourg, France, (2002)
- [Kiefer 2000]** Kiefer F., Heterogenous modelling tools for integrated production systems, *International Journal of Production Research*, Issue. 17, vol. 38, Pages 4149-4157, (2000)
- [Kim 2002]** Kim K.-K., Kang M.-C., Kim J.-S., Jung Y.-H., Kim N.-K., A study on the precision machinability of ball end milling by cutting speed optimization, *Journal of Materials Processing Technology*, Issue. 1, vol. 130-131, Pages 357-362, (2002)
- [King 2003]** King R. K., THE TRIZ-FRACTAL MODEL: Part 1 - On Facilitating the Rapid Diffusion of TRIZ, *TRIZ Journal*, Issue. /, vol. <http://www.triz-journal.com/archives/2003/>, Pages /, (2003)
- [Kiritsis 1999]** Kiritsis D., Neuendorf K.-P., Xirouchakis P., Petri net techniques for process planning cost estimation, *Advances in Engineering Software*, Issue. 6, vol. 30, Pages 375-387, (1999)
- [Komanduri 1982]** Komanduri R., Schroeder T., Hazra J., Turkovich (von) B. F., Flom D. G., On the catastrophic Shear Instability in High-Speed Machining of an AISI 4340 Steel, *Journal of Engineering for Industry*, Issue. 1, vol. 104, Pages 121-131, (1982)
- [Komanduri 2000]** Komanduri R., Hou Z. B., Thermal modeling of the metal cutting process: Part I -- Temperature rise distribution due to shear plane heat source, *International Journal of Mechanical Sciences*, Issue. 9, vol. 42, Pages 1715-1752, (2000)
- [Kopac 1999]** Kopac J., Sokovic M., Dimensional accuracy and cost optimisation in the finish machining of cold formed parts, *Journal of Materials Processing Technology*, Issue. 1, vol. 92-93, Pages 335-343, (1999)
- [Lapujoulade 2002]** Lapujoulade F., Mabrouki T., Raissi K., Prediction du comportement vibratoire du fraisage lateral de finition des pieces a parois minces: Vibratory behavior prediction of thin-walled parts during lateral finish milling, *Mecanique & Industries*, Issue. 4, vol. 3, Pages 403-418, (2002)
- [Lara 2000]** Lara M. A., Nof S. Y., Witzerman J. P., Facility description language for integrating distributed designs, *International Journal of Production Research*, Issue. 11, vol. 38, Pages 2471-2488, (2000)

- [Larroquère 2004]** Larrouquère D., Zerrouki V., Vigneau J., Devillez A., Schneider F., Dominiak S., Dudzinski D., Usinage à Grande Vitesse et à sec de l'inconel 718, Assises MO&UGV, Clermont-Ferrand, (2004)
- [Larue 2003]** Larue A., Anselmetti B., Deviation of a machined surface in flank milling, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Issue. 2, vol. 43, Pages 129-138, (2003)
- [Le Boterf 2003]** Le Boterf G., Développer la compétence des professionnels, Ed. Editions d'Organisation, (2003)
- [Le Calvez 1995]** Le Calvez C., Etude des aspects thermiques et métallurgiques de la coupe orthogonale d'un acier au carbone, Thèse de l'ENSAM Paris, (1995)
- [Le Maitre 1999]** Le Maitre F., Hamann J. C., Trombert C., Usinabilité et mécanismes endommageants des outils de coupe, Matériaux & Techniques, Issue. 5, vol. 1, Pages 5-14, (1999)
- [Le Moigne 1977]** Le Moigne J.-L., La théorie du Système général, Ed. Presses Universitaires de France, (1977)
- [Li 2002]** Li H., Li H., Williams T.-J., Management of complexity in enterprise integration projects by the PERA methodology, Journal of Intelligent Manufacturing, Issue. 6, vol. 13, Pages 417-427, (2002)
- [Lissandre 1990]** Lissandre M., Maîtriser SADT, Ed. Armand Colin, (1990)
- [Liu 1998]** Liu X., Zhang W. J., Issues on the architecture of an integrated general-purpose ShopFloor control software system, Journal of Materials Processing Technology, Issue. 1, vol. 76, Pages 261-269, (1998)
- [Liu 2002]** Liu Z. Q., Ai X., Zhang H., Wang Z. T., Wan Y., Wear patterns and mechanisms of cutting tools in high-speed face milling, Journal of Materials Processing Technology, Issue. 1-3, vol. 129, Pages 222-226, (2002)
- [Livet 2002]** Livet A., Modélisation des Systèmes Physiques de Production pour l'évaluation des Coûts et des Activités, Thèse de l'Université Louis Pasteur - Strasbourg I, (2002)
- [Lopez de Lacalle 2002]** Lopez de Lacalle L. N., Lamikiz A., Sanchez J. A., Arana J. L., Improving the surface finish in high speed milling of stamping dies, Journal of Materials Processing Technology, Issue. 2, vol. 123, Pages 292-302, (2002)
- [Lorino 1998]** Lorino P., Méthodes et pratiques de la performace : Le guide du pilotage, Ed. Les Editions d'Organisations, Paris, (1998)
- [Loureiro 2003]** Loureiro G., Leaney P. G., A system and concurrent engineering framework for the integrated development of space products, Acta Astronautica, Issue. 12, vol. 53, Pages 945-961, (2003)
- [M'Saoubi 2002]** M'Saoubi R., Le Calvez C., Changeux B., Lebrun J. L., Thermal and microstructural analysis of orthogonal cutting of a low alloyed carbon steel using an infrared-charge-coupled device camera technique, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers -- Part B -- Engineering Manufacture, /, (2002)
- [Malhéné 2000]** Malhéné N., Gestion du processus d'évolution des systèmes industriels : conduite et méthode, Thèse de l'Université Bordeaux I, (2000)
- [Malhéné 2003]** Malhéné N., Ducq Y., Vallespir B., Management of industrial enterprises evolution process, Congrès de Génie Industriel, Québec, (2003)
- [Marcotte 1995]** Marcotte F., Doumeingts G., Vallespir B., A proposal for an integrated model of a manufacturing system: Application to the re-engineering of an assembly shop, Control Engineering Practice, Issue. 1, vol. 3, Pages 59-67, (1995)

- [Margerin 1997]** Margerin J., Trahand J., Coût, Encyclopédie de Gestion, Issue. 2, vol. 2, Pages 687-707, (1997)
- [Martinet 2003]** Martinet A. C., Lexique de gestion, Ed. Dalloz, (2003)
- [McCarthy 2002]** McCarthy I., Menicou M., A classification schema of manufacturing decisions for the GRAI enterprise modelling technique, Computers in Industry, Issue. 3, vol. 47, Pages 339-355, (2002)
- [Merchant 1945]** Merchant E., Mechanics of the metal cutting process, Journal of Applied Physics, Issue. 5, vol. 16, Pages 267-275, (1945)
- [Messaoudene 2003]** Messaoudene Z., Formalisation des contradictions pour la conception des systèmes physiques de production : application au lean manufacturing., Thèse de l'Université Louis Pasteur - Strasbourg I, (2003)
- [Messaouedene 2002]** Messaouedene Z., Lutz P., Barth M., Vers la définition d'une stratégie de conception des systèmes de production basée sur le pilotage de l'évolution, IDMME 2002, Clermont-Ferrand, (2002)
- [Molet 2003]** Molet H., Ballot E., Fontane F., Quelques clés pour comprendre l'évolution des systèmes de production et de logistique, Congrès de Génie Industriel, Québec, (2003)
- [Molinari 1999]** Molinari A., Dudzinski D., Moufki A., Approche thermomécanique de la coupe oblique et application aux procédés, Matériaux & Techniques, Issue. 5, vol. 1, Pages 15-21, (1999)
- [Molleman 2002]** Molleman E., Slomp J., Rolefes S., The evolution of a cellular manufacturing system - a longitudinal case study, International Journal of Production Economics, Issue. 3, vol. 75, Pages 305-322, (2002)
- [Moraru 2004]** Moraru G., Brun-Picard D., Ouladsine M., Mas S., Diagnostic et maintenance prédictive des électrobroches UGV, Assises MO&UGV, Clermont-Ferrand, (2004)
- [Ning 2001]** Ning Y., Rahman M., Wong Y. S., Investigation of chip formation in high speed end milling, Journal of Materials Processing Technology, Issue. 1-3, vol. 113, Pages 360-367, (2001)
- [OMG 2003]** OMG, Unified Modeling Language Specification V1.5, Ed. Object Management Group, (2003)
- [Pantalé 1996]** Pantalé O., Modélisation et Simulation Tridimensionnelles de la Coupe des Métaux, Thèse de l'Université de Bordeaux I, (1996)
- [Paris 2003]** Paris H., Contribution à la coopération multi-acteurs : modélisation des contraintes de fabrication pour la conception simultanée d'un produit et de son process de fabrication, Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université Joseph Fourier – Grenoble 1, (2003)
- [Park 2004]** Park S. C., Sculptured surface machining using triangular mesh slicing, Computer-Aided Design, Issue. 3, vol. 36, Pages 279-288, (2004)
- [Peigne 2003]** Peigne G., Etude et simulation des effets dynamiques de la coupe sur la stabilité de la coupe et la qualité géométrique de la surface usinée : application au fraisage de profil, Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, (2003)
- [Pena-Mora 2000]** Pena-Mora F., Hussein K., Vadhavkar S., Benjamin K., CAIRO: a concurrent engineering meeting environment for virtual design teams, Artificial Intelligence in Engineering, Issue. 3, vol. 14, Pages 203-219, (2000)
- [Perry 2004]** Perry N., Mauchand M., Bernard A., Costs models in design and manufacturing of sand casting products, IDMME'04, Bath, (2004)
- [Poler 2002]** Poler R., Lario F. C., Doumeingts G., Dynamic modelling of Decision Systems (DMDS)*1, Computers in Industry, Issue. 2, vol. 49, Pages 175-193, (2002)

- [Poulachon 1999]** Poulachon G., Moisan A., Tournage Dur : formation du copeau et endommagement d'un outil PcBN, *Matériaux & Techniques*, Issue. 5, vol. 1, Pages 33-41, (1999)
- [Poulachon 2002]** Poulachon G., Moisan A. L., Dessoly M., A contribution to the study of the cutting mechanisms in hard turning, *Mecanique & Industries*, Issue. 4, vol. 3, Pages 291-299, (2002)
- [Poveda 2001]** Poveda O., Pilotage technique des projets d ingénierie simultanée, modélisation des processus, analyse et instrumentation, Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, (2001)
- [Prasad 1996]** Prasad B., Concurrent engineering fundamentals: Integrated product and process organization, Ed. Prentice Hall PTR, New-Jersey, (1996)
- [Pretorius 2000]** Pretorius M. W., de Wet G., A model for the assessment of new technology for the manufacturing enterprise, *Technovation*, Issue. 1, vol. 20, Pages 3-10, (2000)
- [Remadna 2001]** Remadna M., Le comportement du système usinant en tournage dur. Application au cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN (nitruure de bore cubique), Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (2001)
- [Renevier 2003]** Renevier N. M., Oosterling H., Konig U., Dautzenberg H., Kim B. J., Geppert L., Koopmans F. G. M., Leopold J., Performance and limitation of hybrid PECVD (hard coating)--PVD magnetron sputtering (MoS₂/Ti composite) coated inserts tested for dry high speed milling of steel and grey cast iron, *Surface and Coatings Technology*, Issue. Pages 659-667, vol. 163-164, (2003),0
- [Rochfeld 1983]** Rochfeld A., Tardieu H., Merise : an information system design and development methodology, *Information & Management*, Issue. 3, vol. 6, Pages 143-159, (1983)
- [Rouaud 2004]** Rouaud P. O., La quête de la performance dicte sa loi, *L'Usine Nouvelle*, Issue. /, vol. 2909, Pages 8-12, (2004)
- [Sabourin 1996]** Sabourin L., Villeneuve F., OMEGA, an expert CAPP system, *Advances in Engineering Software*, Issue. 1, vol. 25, Pages 51-59, (1996)
- [Salamatov 1999]** Salamatov Y., TRIZ : The Right Solution at the Right Time. A guide to Innovative Problem Solving, Ed. Insytec B.V., (1999)
- [Saleh 2003]** Saleh J. H., Hastings D. E., Newman D. J., Flexibility in system design and implications for aerospace systems, *Acta Astronautica*, Issue. 12, vol. 53, Pages 927-944, (2003)
- [Sandvik 2002]** Sandvik, Usinage Grande Vitesse, Ed. Sandvik Coromant, (2002)
- [Savransky 2000]** Savransky S. D., Engineering of Creativity. Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving, Ed. CRC Press, (2000)
- [Sayettat 2000]** Sayettat C., Devalan P., Les besoins des entreprises de l'industrie mécanique en matière d'ingénierie mécanique, *Mecanique & Industries*, Issue. 1, vol. 1, Pages 5-14, (2000)
- [Scherer 2002]** Scherer M., Cinq problèmes résolus en UGV, *Industrie et Technologie*, Issue. 639, vol. /, Pages 57-60, (2002)
- [Schulz 1989]** Schulz H., Hochgeschwindigkeitsfräsen metallischer und nichtmetallischer Werkstoffe, Ed. Hanser, (1989)
- [Shaw 2003]** Shaw C. F., Hattori M., Cost and Process Information Modeling for Dry Machining, *CIRP*, Grenoble, (2003)
- [Shehab 2001]** Shehab E. M., Abdalla H. S., Manufacturing cost modelling for concurrent product development, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Issue. 4, vol. 17, Pages 341-353, (2001)

- [Sohal 1999]** Sohal A. S., Introducing new technology in to a small business: a case study, *Technovation*, Issue. 3, vol. 19, Pages 187-193, (1999)
- [Sohlenius 1992]** Sohlenius G., Concurrent Engineering, *Annals of the CIRP*, Issue. 2, vol. 41, Pages /, (1992)
- [Spiewak 2001]** Spiewak S. A., Nickel T., Vibration based preload estimation in machine tool spindles, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Issue. 4, vol. 41, Pages 567-588, (2001)
- [Stratton 2003]** Stratton R., Warburton R. D. H., The strategic integration of agile and lean supply, *International Journal of Production Economics*, Issue. 2, vol. 85, Pages 183-198, (2003)
- [Suh 1990]** Suh N. P., *The Principles of Design*, Ed. Oxford Series on Advanced Manufacturing, (1990)
- [Sun 2000]** Sun H., Current and future patterns of using advanced manufacturing technologies, *Technovation*, Issue. 11, vol. 20, Pages 631-641, (2000)
- [Taiber 1996]** Taiber J. G., Optimization of process sequences considering prismatic workpieces, *Advances in Engineering Software*, Issue. 1, vol. 25, Pages 41-50, (1996)
- [Terrier 2004]** Terrier M., Dugas A., Hascoet J.-Y., Qualification of parallel kinematics machines in high-speed milling on free form surfaces, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Issue. 7-8, vol. 44, Pages 865-877, (2004)
- [Tomala 2002]** Tomala F., Proposition de modèles et méthodes pour l'aide à l'évaluation des performances d'une innovation dès sa conception, Thèse de l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambresis, (2002)
- [Tsubone 1999]** Tsubone H., Horikawa M., A Comparison Between Machine Flexibility and Routing Flexibility, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Issue. 1, vol. 11, Pages 83-101, (1999)
- [Van Brussel 1998]** Van Brussel H., Wyns J., Valckenaers P., Bongaerts L., Peeters P., Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA, *Computers in Industry*, Issue. /, vol. 37, Pages 255-274, (1998)
- [Vernadat 1999]** Vernadat F., *Techniques de modélisation en Entreprise : Applications aux processus opérationnels*, Ed. ECONOMICA, (1999)
- [Vernet 1997]** Vernet M., Arasti M. R., Mécanisme d'élaboration de stratégies technologiques cohérentes avec la stratégie globale d'entreprise, *Congrès de Génie Industriel*, Albi, (1997)
- [Vidal 2004]** Vidal O., Démarche de conception d'un centre d'Usinage Grande Vitesse pour la Production de pièces en Grande Série, *Assises MO&UGV*, Clermont-Ferrand, (2004)
- [Williams 1992]** Williams T. J., *The Purdue Enterprise Reference Architecture*, Ed. Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC., (1992)
- [Winner 1988]** Winner R., Pennel J., Bertrand H., Slusarczuk M., The role of concurrent engineering in weapon systems acquisition, Ed. IDA Report R-338." Institute of Defense Analyses Alexandria, USA., (1988)
- [Woodward 1997]** Woodward D. G., Life cycle costing--Theory, information acquisition and application, *International Journal of Project Management*, Issue. 6, vol. 15, Pages 335-344, (1997)
- [Yang 2001]** Yang Y.-N., Parsaei H. R., Leep H. R., A prototype of a feature-based multiple-alternative process planning system with scheduling verification, *Computers & Industrial Engineering*, Issue. 1-2, vol. 39, Pages 109-124, (2001)

[Yeh 2002] Yeh L.-J., Lan T.-S., The optimal control of material removal rate with fixed tool life and speed limitation, *Journal of Materials Processing Technology*, Issue. 2-3, vol. 121, Pages 238-242, (2002)

[Yen 2004] Yen Y.-C., Sohner J., Lilly B., Altan T., Estimation of tool wear in orthogonal cutting using the finite element analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, Issue. 1, vol. 146, Pages 82-91, (2004)

[Yurdakul 2004] Yurdakul M., AHP as a strategic decision-making tool to justify machine tool selection, *Journal of Materials Processing Technology*, Issue. 3, vol. 146, Pages 365-376, (2004)

[Zhang 2002] Zhang G. W., Zhang S. C., Xu Y. S., Research on flexible transfer line schematic design using hierarchical process planning, *Journal of Materials Processing Technology*, Issue. 1-3, vol. 129, Pages 629-633, (2002)

[Zhang 2003] Zhang Q., Vonderembse M. A., Lim J.-S., Manufacturing flexibility: defining and analyzing relationships among competence, capability, and customer satisfaction, *Journal of Operations Management*, Issue. 2, vol. 21, Pages 173-191, (2003)

Annexes

Annexe U1 : espace partagé de communication après la phase 1 b.....	230
Annexe U2 : espace partagé de communication après la phase 1 c.....	231
Annexe U3 : espace partagé de communication après la phase 2 e.....	232
Annexe U4 : espace partagé de communication après la phase 2 f (niveaux 3 et 4).....	233
Annexe U5 : espace partagé de communication après la phase 2 f (niveaux 1 et 2).....	234
Annexe U6 : Architectures extrêmes des composants assurant la flexibilité.....	235
Annexe U7 : Dessin de définition du carter HW30.....	236
Annexe U8 : Dessin de définition du brut du HW30.....	237
Annexe U9 : Dessin d'ensemble du montage d'usinage actuel du HW30.....	238
Annexe U10 : Description de la gamme version (111).....	239
Annexe U11 : Description de la gamme version (133).....	240
Annexe U12 : Description de la gamme version (211).....	241
Annexe V1 : Correspondance entre les temps d'état CNOMO et les paramètres temporels du modèle de problèmes.....	242
Annexe D1 : Description générique des inducteurs de coûts.....	243
Annexe D2 : Description instanciée des inducteurs de coûts au niveau 1.....	244
Annexe D3 : Description instanciée des inducteurs de coûts au niveau 2.....	245
Annexe D4 : Description instanciée des inducteurs de coûts au niveau 3.....	246
Annexe D5 : Description instanciée des inducteurs de coûts au niveau 4.....	247
Annexe E1 : Diagramme de classes du Modèle des Systèmes Opérationnels de Production.....	248
Annexe E2 : Diagramme de classes du Modèle de Problèmes.....	249

Annexe U1 : espace partagé de communication après la phase 1 b

Faire des Produits de QUALITE	Assurer un Retour sur Investissement à LT	Faire une DIVERSITE de Produits
Pb1 Maintenance sur machines spéciales	Pb7 « On aimerait en faire plus »	Pb13 Variations sur quantité à produire * Variations sur nombre de références * Saisonnalité de 30%
Pb2 Certains postes sont des goulots : Le lavage et certains usinages	Pb8 Plusieurs générations de pièces en parallèle * Durée de vie < à 10 ans * SAV sur quelques années supplémentaires	Pb14 Nouvelles variantes régulières
Pb3 Quelques pièces critiques * Lots de 500 à 1000 pièces par an et beaucoup de rebuts * Pièces de plus en plus petites (pour l'électronique) * Réalisées à l'outillage. * Besoin de désengorger ce secteur * A réaliser en Prototypes et en production stabilisée	Pb9 Pas assez de volume pour des références à faible valeur ajoutée * Moyens parfois sur-dimensionnés pour ces pièces à faible VA	Pb15 Beaucoup d'outils spécifiques * Tend à utiliser des outils standards pour les taraudages
Pb4 Certaines machines en limite de capacité * Anticipation des dérives par fort autocontrôle et validation par laboratoire de métrologie * Déformations de certaines pièces pendant l'usinage * Pb de conception sur certaines références	Pb10 Pas de problèmes de stocks * Bâtiments et structure donnés * Impact déjà minimisé (respect du 0 rupture) * Prix de la matière première en hausse (tendance à long terme)	Pb16 Stabilité sur les matériaux usinés * Aluminium pour boîtes à bornes, mais quantité en augmentation * Regroupé sur une même cellule * Pas de tolérances serrées sur les pièces en alu
Pb5 Travail par familles de pièces * Mêmes méthodes mais grande hétérogénéité des dimensions * Montages d'usinage deviennent inadaptés pour grandes pièces (déformations non maîtrisées)	Pb11 Coût des consommables élevé : * pas de gestion centralisée des outils	Pb17 Aimerait un lubrifiant universel pour fonte et aluminium
Pb6 Pb de maîtrise du lubrifiant	Pb12 Coût du retraitement des lubrifiants	Pb18 Même type de montage au sein d'une même famille de pièces (gamme standards pour les pièces d'une même famille) Pb19 Gestion lourde des outils Pb20 Pas de système de gestion Pb21 Pas de système de suivi des machines

Annexe U2 : espace partagé de communication après la phase 1 c

Faire des Produits de QUALITE		Assurer un Retour sur Investissement à LT		Faire une DIVERSITE de Produits	
Élément 3 Délais de Fabrication des produits	Élément 4 Précision des produits	Élément 1 INFLOWS	Élément 2 OUTFLOWS	Élément 5 Nombre de produits différents par unité de temps (FLEXIBILITE)	Élément 6 Proportion du Temps de reconfiguration (REACTIVITE)
Fc(#Pb1) Maintenance sur machines spéciales	Fc(#Pb3) Quelques pièces critiques	Fc(#Pb7) Aimerait en faire plus	Fc(#Pb10) Pas de problèmes de stocks	Fc(#Pb13) Variations sur quantité à produire	Fc(#Pb19) Gestion lourde des outils
	* Lots de 500 à 1000 pièces par an et Beaucoup de rebuts		* Batiments et structure donnés	* Variations sur nombre de références	
Fc(#Pb2) Certains postes sont des goulots : Le lavage et certains usinages (??)	* Pièces de plus en plus petites (pour l'électronique)	Fc(#Pb8) Plusieurs générations de pièces en parallèle	* Impact déjà minimisé (respect du 0 rupture)	* Saisonnalité de 30%	Fc(#Pb20) Pas de système de gestion
	* Réalisées à l'outillage.	* Durée de vie < à 10 ans	* Prix de la matière première en hausse (tendance à long terme)		
	* Besoin de désengorger ce secteur	* SAV sur quelques années supplémentaires		Fc(#Pb14) Nouvelles variantes régulières	Fc(#Pb21) Pas de système de suivi des machines
	* A réaliser en Prototype et en production stabilisée		Fc(#Pb11) Coût des consommables élevé :		
	Fc(#Pb4) Certaines machines en limite de capacité	Fc(#Pb9) Pas assez de volume pour des références à faible valeur ajoutée	* Pas de gestion centralisée des outils	Fc(#Pb15) Beaucoup d'outils spécifiques	
	* Anticipation des dérives par fort autocontrôle et validation par laboratoire de métrologie	* Moyens parfois sur dimensionnés pour ces pièces à faible VA		* Tend à utiliser des outils standards pour les taraudages	
	* Déformations de certaines pièces pendant l'usinage		Fc(#Pb12) Coût du retraitement des lubrifiants		
	* Pb de conception sur certaines références			Fc(#Pb16) Stabilité sur les matériaux usinés	
	Fc(#Pb5) Travail par familles de pièces			* Aluminium pour boîtes à bornes, mais quantité en augmentation	
	* Mêmes méthodes mais grande hétérogénéité des dimensions			* Regroupé sur une même cellule	
	* Montage deviennent inadaptés pour grandes pièces (déformations)			* Pas de tolérances serrées sur les pièces en alu	
	Fc(#Pb6) Pb de maîtrise du lubrifiant			Fc(#Pb17) Aimerait un lubrifiant universel pour fonte et aluminium	
				Fc(#Pb18) Même type de montage au sein d'une même famille de pièces (gammes standards pour les pièces d'une même famille)	

Annexe U3 : espace partagé de communication après la phase 2 e

	Faire des Produits de QUALITE		Assurer un Retour sur Investissement à LT		Faire une DIVERSITE de Produits	
	Élément 3 DELAI	Élément 4 PRECISION	Élément 1 INFLOWS	Élément 2 OUTFLOWS	Élément 5 FLEXIBILITE	Élément 6 REACTIVITE
Niveau 4	Fe(#Fc_Pb1) Maintenance sur machines spéciales	Fe(#Fc_Pb3)(4) Quelques pièces critiques * Lots de 500 à 1000 pièces par an et Beaucoup de rebuts	Fe(#Fc_Pb7) Aimerait en faire plus	Fe(#Fc_Pb10) Pas de problèmes de stocks	Fe(#Fc_Pb13) Variations sur quantité à produire	Fe(#Fc_Pb20) Pas de système de gestion
	Fe(#Fc_Pb2) Certains postes sont des goulots : Le lavage et certains usinages		Fe(#Fc_Pb8) Pas assez de volume pour des références à faible valeur ajoutée * Moyens parfois sur dimensionnés pour ces pièces à faible VA	* Bâtiments et structure donnés * Impact déjà minimisé (respect du 0 rupture) * Prix de la matière première en hausse (tendance à long terme)	* Variations sur nombre de références * Saisonnalité de 30%	Fe(#Fc_Pb21) Pas de système de suivi des machines
Niveau 3		Fe(#Fc_Pb3)(3) * Pièces de plus en plus petites (pour l'électronique) * Réalisées à l'outillage. * Besoin de désengorger ce secteur * A réaliser en Prototype et en production stabilisée	Fe(#Fc_Pb4)(3) Certaines machines en limite de capacité * Pb de conception sur certaines références		Fe(#Fc_Pb14) Nouvelles variantes régulières	
		Fe(#Fc_Pb5) Travail par familles de pièces * Mêmes méthodes mais grande hétérogénéité des dimensions * Montage deviennent inadaptés pour grandes pièces (déformations)	Fe(#Fc_Pb8) Plusieurs générations de pièces en parallèle		Fe(#Fc_Pb18) Même type de montage au sein d'une même famille de pièces (gamme standards pour les pièces d'une même famille)	
Niveau 2		Fe(#Fc_Pb4)(2) Certaines machines en limite de capacité * Anticipation des dérives par fort autocontrôle et validation par laboratoire de métrologie	* Durée de vie < à 10 ans * SAV sur quelques années supplémentaires		Fe(#Fc_Pb15) Beaucoup d'outils spécifiques * Tend à utiliser des outils standards pour les taraudages	Fe(#Fc_Pb19) Gestion lourde des outils
		Fe(#Fc_Pb6) Pb de maîtrise du lubrifiant		Fe(#Fc_Pb11) Coût des consommables élevé : * pas de gestion centralisée des outils	Fe(#Fc_Pb16) Stabilité sur les matériaux usinés * Aluminium pour boîtes à bornes, mais quantité en augmentation * Regroupé sur une même cellule * Pas de tolérances serrées sur les pièces en alu	
Niveau 1				Fe(#Fc_Pb12) Coût du retraitement des lubrifiants	Fe(#Fc_Pb17) Aimerait un lubrifiant universel pour fonte et aluminium	

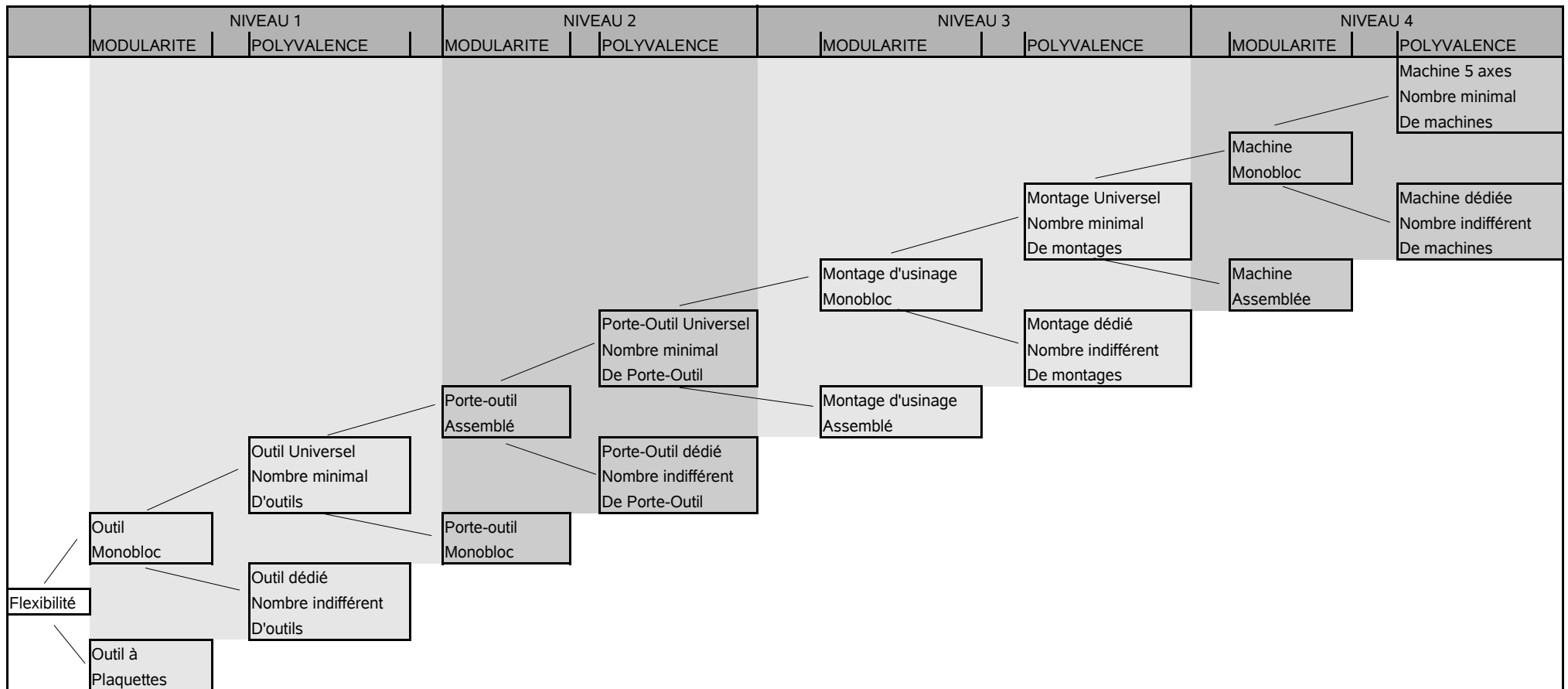
Annexe U4 : espace partagé de communication après la phase 2 f (niveaux 3 et 4)

Faire des Produits de QUALITE		Assurer un Retour sur Investissement à LT		Faire une DIVERSITE de Produits	
Élément 3 DELAÏ	Élément 4 PRECISION	Élément 1 INFLOWS	Élément 2 OUTFLOWS	Élément 5 FLEXIBILITE	Élément 6 REACTIVITE
<p>N 4</p> <p>Ff(#Fe_Fc_Pb1)</p> <p>Maintenance sur machines spéciales</p> <p>Parfois Pb lié au montage ; le plus souvent lié à la machine</p>	<p>Ff(#Fe_Fc_Pb3_4)(4)</p> <p>Quelques pièces critiques</p>	<p>Ff(#Fe_Fc_Pb7)</p> <p>*Plus de valeur ajoutée recherchée. Voir simplification des brutsou diminuer la sensibilité par rapport aux variations du brut. Idem pour la lubrification</p>	<p>Ff(#Fe_Fc_Pb10)</p> <p>Pas de problèmes de stocks</p>	<p>Ff(#Fe_Fc_Pb13)</p> <p>Variations sur quantité à produire</p>	<p>Ff(#Fe_Fc_Pb20)</p> <p>Plusieurs systèmes de gestion en cohabitation : Kanban, MRP sous SAP</p>
	<p>* Lots de 500 à 1000 pièces par an et Beaucoup de rebuts</p>	<p>*Compétition avec les autres sites</p>	<p>* Bâtiments et structure donnés</p>	<p>* Variations sur nombre de références et Saisonnalité de 30%</p>	<p>Ff(#Fe_Fc_Pb21)</p>
	<p>*Machines surcapacitaires donc ajout de petits lots pour augmenter la charge (ces pièces sont devenus des moutons à 5 pattes, car allouées à des machines non prévues pour)</p>	<p>*Plus de valeur ajoutée recherchée. Voir simplification des brutsou diminuer la sensibilité par rapport aux variations du brut. Idem pour la lubrification</p>	<p>* Impact déjà minimisé (respect du 0 rupture) et Prix de la matière première en hausse (tendance à long terme)</p>		<p>Pas de système de suivi des machines pour la maintenance ou la maîtrise</p>
<p>Ff(#Fe_Fc_Pb2)</p> <p>Certains postes sont des goulots : Limite de capacité surtout sur le lavage</p> <p>Pb sur le goulot à l'usinage (perçage des flasques) va disparaître</p>	<p>*Rebuts :</p> <p>Pièces de réglages (8 à 10% des rebuts)</p>	<p>Ff(#Fe_Fc_Pb9)</p> <p>Pas assez de volume pour des références à faible valeur ajoutée</p> <p>* Moyens parfois sur dimensionnés pour ces pièces à faible VA. Lié à Ff(#Fe_Fc_Pb7)</p>			<p>Pas de supervision</p> <p>Seul le taux de disponibilité est suivi</p>
<p>N 3</p>	<p>Ff(#Fe_Fc_Pb5)</p> <p>Travail par familles de pièces</p> <p>* Mêmes méthodes mais grande hétérogénéité des dimensions</p> <p>* Montage deviennent inadaptés pour grandes pièces (déformations)</p> <p>*Toujours dans la fourchette de tolérance</p> <p>*Parfois ajout d'une solution intermédiaire</p> <p>*Mise en place automatique ou manuelle et tous types de bridage rencontrés</p>	<p>Fe(#Fc_Pb4)(3)</p> <p>Certaines machines en limite de capacité</p> <p>* Pb de conception sur certaines références</p> <p>*Surtout pb de précision car autocontrôle 100% instauré</p>		<p>Ff(#Fe_Fc_Pb14)</p> <p>Nouvelles variantes régulières et le panel de pièces s'élargit (Pb de flex et pas de lancement)</p>	
		<p>Ff(#Fe_Fc_Pb8)</p> <p>Plusieurs générations de pièces en parallèle</p> <p>Pb d'insertion dans la production (et pas de précision ou de délai). A lier à Ff(#Fe_Fc_Pb3_3)</p>		<p>Ff(#Fe_Fc_Pb18)</p> <p>Même type de montage au sein d'une même famille de pièces (gammes standards pour les pièces d'une même famille)</p> <p>*Pas 2 mêmes pièces en même temps</p>	
	<p>Ff(#Fe_Fc_Pb3_4)(3)</p> <p>*Rebuts :</p> <p>Variations de géométrie du brut</p>	<p>*Durée de vie des variantes</p> <p>* SAV sur quelques années supplémentaires</p>		<p>Ff(#Fe_Fc_Pb3_3)</p> <p>* Pièces de plus en plus petites (pour l'électronique)</p> <p>* Réalisées à l'outillage.</p> <p>* Besoin de désengorger ce secteur</p> <p>* A réaliser en Proto et en stabilisé</p> <p>*Difficiles à insérer dans la production</p> <p>*Pas de pb de précision ni de délai</p>	

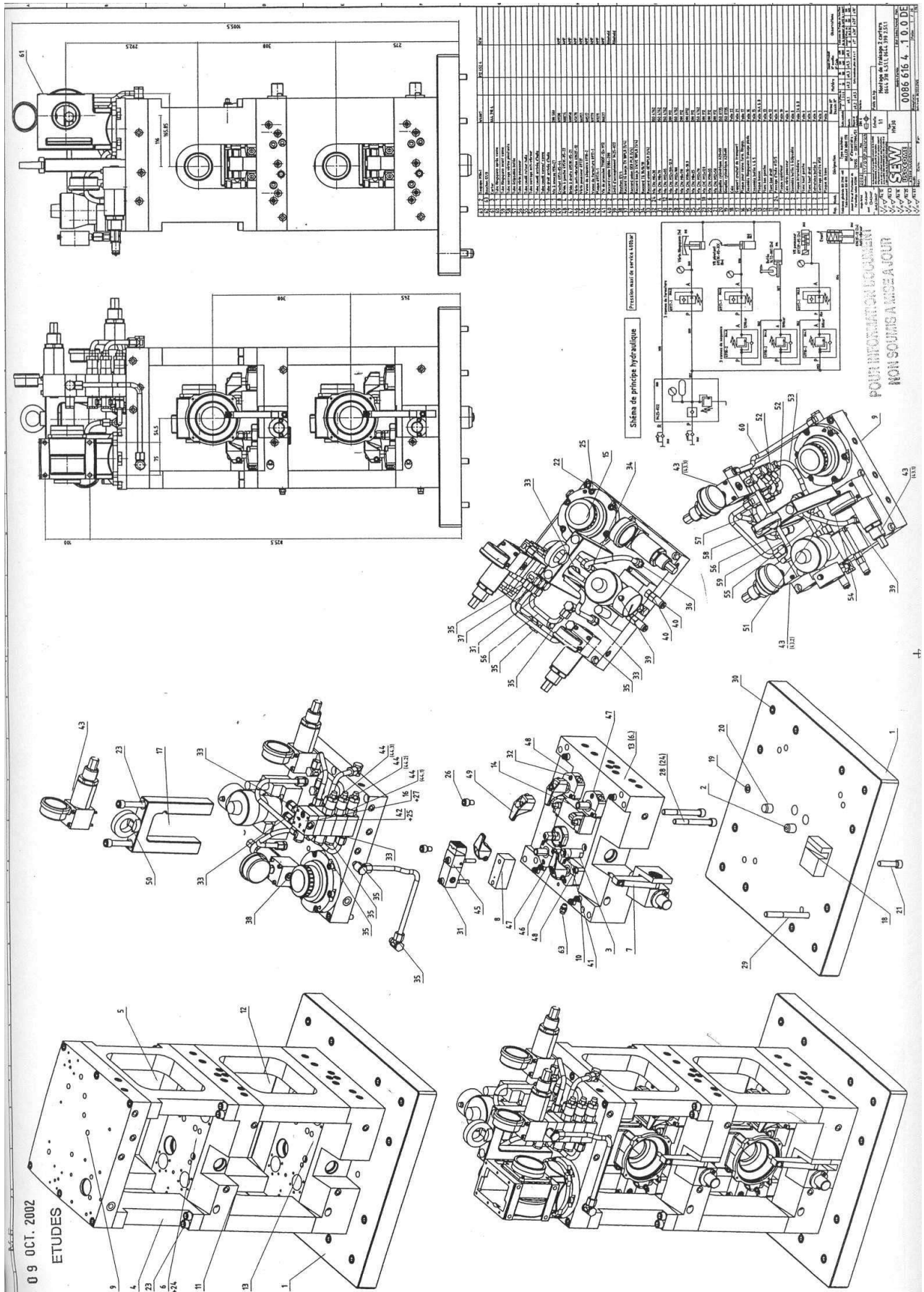
Annexe U5 : espace partagé de communication après la phase 2 f (niveaux 1 et 2)

Faire des Produits de QUALITE		Assurer un Retour sur Investissement à LT		Faire une DIVERSITE de Produits	
Élément 3 DELAI	Élément 4 PRECISION	Élément 1 INFLOWS	Élément 2 OUTFLOWS	Élément 5 FLEXIBILITE	Élément 6 REACTIVITE
N 2	<p>Ff(#Fe_Fc_Pb4_2)(2)</p> <p>Certaines machines en limite de capacité</p> <p>* Anticipation des dérives par fort autocontrôle sur le dimensionnel et validation par laboratoire de métrologie</p>			<p>Ff(#Fe_Fc_Pb15)</p> <p>Beaucoup d'outils spécifiques</p> <p>* Tend à utiliser des outils standards pour les taraudages</p> <p>*Tous les cas possibles (ISO ou pas...)</p>	<p>Ff(#Fe_Fc_Pb19)</p> <p>Gestion lourde des outils</p> <p>Chantiers en cours</p>
	<p>Ff(#Fe_Fc_Pb3_4)(2)</p> <p>*Rebut : Variations de surépaisseurs</p>				
N 1	<p>Ff(#Fe_Fc_Pb6)</p> <p>Pb de maîtrise du lubrifiant</p> <p>Pas d'universel pour l'instant</p> <p>Stabilité des bains, retraitement, boues avec la fonte</p>		<p>Ff(#Fe_Fc_Pb11)</p> <p>Coût des consommables élevé :</p> <p>* pas de gestion centralisée des outils</p>	<p>Ff(#Fe_Fc_Pb16)</p> <p>Stabilité sur les matériaux usinés</p>	
	<p>Ff(#Fe_Fc_Pb3_4)(1)</p> <p>*Rebut : Variations de matériaux</p>		<p>Ff(#Fe_Fc_Pb12)</p> <p>Coût du retraitement des lubrifiants</p>	<p>* Aluminium pour boîtes à bornes, mais quantité en augmentation</p> <p>* Regroupé sur une même cellule</p> <p>* Pas de tolérances serrées sur les pièces en alu</p>	
	<p>Ff(#Fe_Fc_Pb4_2)(1)</p> <p>Maîtrise difficile de l'usure due aux variations de matériaux</p>			<p>Ff(#Fe_Fc_Pb17)</p> <p>Aimerait un lubrifiant universel pour fonte et aluminium</p>	

Annexe U6 : Architectures extrêmes des composants assurant la flexibilité



Annexe U9 : Dessin d'ensemble du montage d'usinage actuel du HW30



09 OCT. 2002
ETUDES

Annexe U10 : Description de la gamme version (111)

Séparation des entité d'usinage en privilégiant la flexibilité maximale (supprimer les têtes à aléser) + ébauches et finitions séparées + [Forets et tarauds]								
N°	Type d'opération	Nom de l'opération	Trajectoire	Groupe de surfaces	Type d'outil	Diamètre outil	N° outil	Valeur de B
1	Ébauche	Surfaçage	2D ½	PL3	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	180
2	Ébauche	Alésage	Hélicoïde	CYL1	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	90
2	Ébauche	Dressage	2D ½	CYL1	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	90
2		Chanfrein 15	?	CYL1	?		2	90
3		Rainure Circlips	2D ½	CYL1	Fraise à circlips ép1,85	44	3	90
1	Ébauche	Surfaçage	2D ½	PL1	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	0
4	Ébauche	Alésage	Axiale	CYL2	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	0
4		Chanfrein 30	?	CYL2	?		4	0
4		Chanfrein 15	?	CYL2	?		2	0
5		Rainure Circlips	2D ½	CYL2	Fraise à circlips ép2,5	44	5	0
6		Perçage	Axiale	TT1	Foret	4,2	6	0
7		Taraudage	Axiale	TT1	Taraud M5	5	7	0
8	Ébauche	Dressage	2D ½	CYL3	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	270
8	Ébauche	Cylindrage	Hélicoïde	CYL3	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	270
9	Ébauche	Surfaçage	2D ½	PL2	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	270
10	Ébauche	Alésage	Hélicoïde	CYL4	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	270
8		Chanfrein 30	?	CYL3	?		4	270
10		Chanfrein 15	?	CYL4	?		2	270
11		Rainure Circlips	2D ½	CYL4	Fraise à circlips ép2,15	44	8	270
12		Perçage	Axiale	TT2	Foret	6,8	9	270
13		Taraudage	Axiale	TT2	Taraud M8	8	10	270
14	Finition	Surfaçage	2D ½	PL2	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	11	270
15	Finition	Cylindrage	Hélicoïde	CYL3	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	11	270
15	Finition	Alésage	Hélicoïde	CYL4	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	11	270
15	Finition	Alésage	Hélicoïde	CYL1	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	11	90
16	Finition	Alésage	Hélicoïde	CYL2	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	11	0
17	Finition	Surfaçage	2D ½	PL1	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	11	0
17	Finition	Surfaçage	2D ½	PL3	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	11	180
18		Perçage	Axiale	TT3	Foret	5	12	180
19		Taraudage	Axiale	TT3	Taraud M6	6	13	180

13 outils différents

17 changements

7 positions de plateau

Annexe U11 : Description de la gamme version (133)

Séparation des entité d'usinage en privilégiant la flexibilité maximale (supprimer les têtes à aléser) + ébauches et finitions séparées + [Forets et tarauds M5] + outil combiné en M6 et M8								
N°	Type d'opération	Nom de l'opération	Trajectoire	Groupe de surfaces	Type d'outil	Diamètre outil	N° outil	Valeur de B
1	Ébauche	Surfaçage	2D ½	PL3	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	180
2	Ébauche	Alésage	Hélicoïde	CYL1	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	90
2	Ébauche	Dressage	2D ½	CYL1	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	90
2		Chanfrein 15	?	CYL1	?		2	90
3		Rainure Circlips	2D ½	CYL1	Fraise à circlips ép1,85	44	3	90
1	Ébauche	Surfaçage	2D ½	PL1	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	0
4	Ébauche	Alésage	Hélicoïde	CYL2	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	0
4		Chanfrein 30	?	CYL2	?		4	0
4		Chanfrein 15	?	CYL2	?		2	0
5		Rainure Circlips	2D ½	CYL2	Fraise à circlips ép2,5	44	5	0
6		Perçage	Axiale	TT1	Foret	4,2	6	0
7		Taraudage	Axiale	TT1	Taraud M5	5	7	0
8	Ébauche	Dressage	2D ½	CYL3	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	270
8	Ébauche	Cylindrage	Hélicoïde	CYL3	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	270
9	Ébauche	Surfaçage	2D ½	PL2	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	270
10	Ébauche	Alésage	Hélicoïde	CYL4	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	270
8		Chanfrein 30	?	CYL3	?		4	270
10		Chanfrein 15	?	CYL4	?		2	270
11		Rainure Circlips	2D ½	CYL4	Fraise à circlips ép2,15	44	8	270
12		Perçage taraudage	Hélicoïde	TT2	Outil combiné M8		9	270
14	Finition	Surfaçage	2D ½	PL2	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	11	270
15	Finition	Cylindrage	Hélicoïde	CYL3	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	11	270
15	Finition	Alésage	Hélicoïde	CYL4	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	11	270
15	Finition	Alésage	Hélicoïde	CYL1	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	11	90
16	Finition	Alésage	Hélicoïde	CYL2	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	11	0
17	Finition	Surfaçage	2D ½	PL1	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	11	0
17	Finition	Surfaçage	2D ½	PL3	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	11	180
18		Perçage taraudage	Hélicoïde	TT3	Outil combiné M6		10	180

11 outils différents

15 changements

7 positions de plateau

Annexe U12 : Description de la gamme version (211)

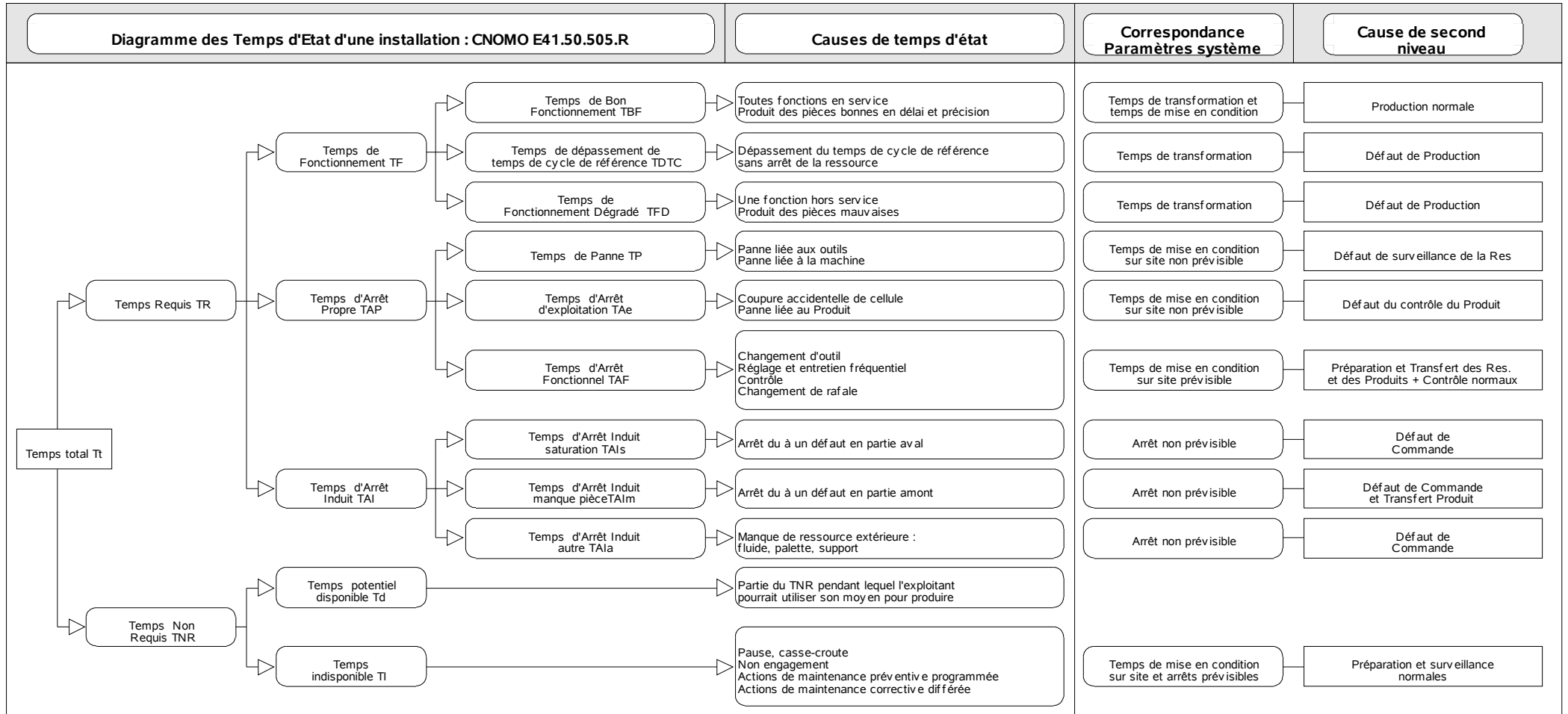
Séparation des entité d'usinage en privilégiant la flexibilité maximale. En supprimant les têtes à aléser, avec usinage séparé des groupes de surfaces et forets et tarauds								
N°	Type d'opération	Nom de l'opération	Trajectoire	Groupe de surfaces	Type d'outil	Diamètre outil	N° outil	Valeur de B
1	Ébauche	Surfaçage	2D ½	PL1	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	0
4	Ébauche	Alésage	Hélicoïde	CYL2	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	0
4		Chanfrein 30	?	CYL2	?		4	0
4		Chanfrein 15	?	CYL2	?		2	0
5		Rainure Circlips	2D ½	CYL2	Fraise à circlips ép2,5	44	5	0
6		Perçage	Hélicoïde	TT1	Foret	4,2	6	0
7		Taraudage	Axiale	TT1	Taraud M5	5	7	0
16	Finition	Alésage	Hélicoïde	CYL2	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	10	0
17	Finition	Surfaçage	2D ½	PL1	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	10	0
2	Ébauche	Alésage	Hélicoïde	CYL1	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	90
2	Ébauche	Dressage	2D ½	CYL1	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	90
2		Chanfrein 15	?	CYL1	?		2	90
3		Rainure Circlips	2D ½	CYL1	Fraise à circlips ép1,85	44	3	90
15	Finition	Alésage	Hélicoïde	CYL1	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	10	90
8	Ébauche	Dressage	2D ½	CYL3	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	270
8	Ébauche	Cylindrage	Hélicoïde	CYL3	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	270
9	Ébauche	Surfaçage	2D ½	PL2	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	270
10	Ébauche	Alésage	Hélicoïde	CYL4	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	270
8	Ébauche	Chanfrein 30	?	CYL3	?		4	270
10	Ébauche	Chanfrein 15	?	CYL4	?		2	270
11		Rainure Circlips	2D ½	CYL4	Fraise à circlips ép2,15	32	8	270
12		Perçage	Hélicoïde	TT2	Foret	6,8	9	270
13		Taraudage	Axiale	TT2	Taraud M8	8	11	270
14	Finition	Surfaçage	2D ½	PL2	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	10	270
15	Finition	Cylindrage	Hélicoïde	CYL3	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	10	270
15	Finition	Alésage	Hélicoïde	CYL4	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	10	270
1	Ébauche	Surfaçage	2D ½	PL3	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	1	180
17	Finition	Surfaçage	2D ½	PL3	Fraise 2 Tailles à Plaquette	32	10	180
18		Perçage	Hélicoïde	TT3	Foret	5	12	180
19		Taraudage	Axiale	TT3	Taraud M6	6	13	180

13 outils

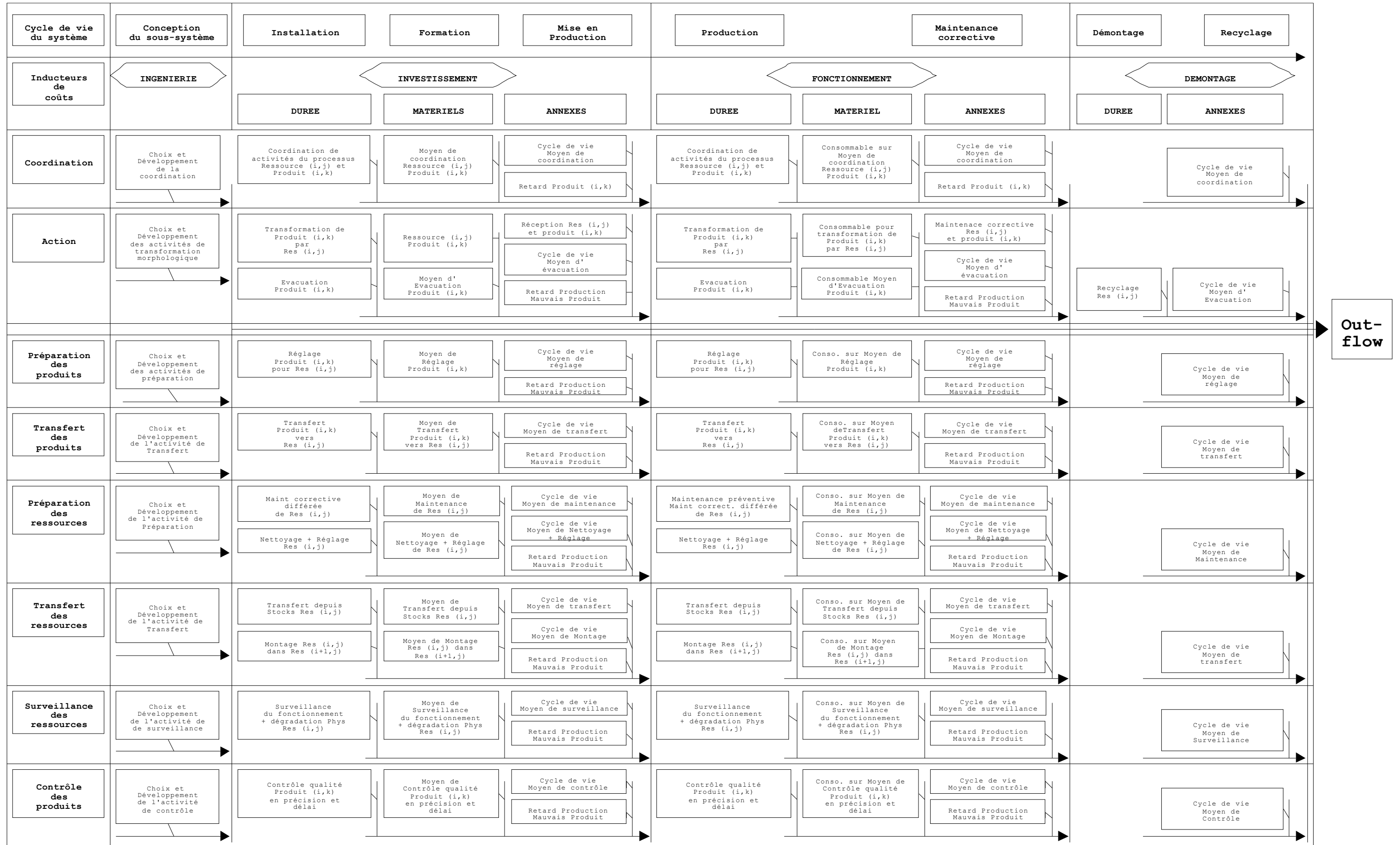
21 changements

4 positions de plateau

Annexe V1 : Correspondance entre les temps d'état CNOMO et les paramètres temporels du modèle de problèmes



Annexe D1 : Description générique des inducteurs de coûts



Out-flow

Annexe D2 : Description instanciée des inducteurs de coûts au niveau 1

Cycle de vie du système	Conception du sous-système	Installation	Formation	Mise en Production	Production	Maintenance corrective	Démontage	Recyclage
Niveau 1 Arete de coupe (1,j) /Copeau (1,k)	INGENIERIE	INVESTISSEMENT			FONCTIONNEMENT			DEMONTAGE
		DUREE	MATERIELS	ANNEXES	DUREE	MATERIEL	ANNEXES	DUREE ANNEXES
Coordination	Choix et Développement de la commande de broche et de la lubrification	Durée de calcul pour paramètres broche et lubrification	Module de commande de broche et de lubrification	Cycle de vie Moyen de coordination Retard copeau (1,k)	Durée de calcul pour paramètres broche et lubrification	Consommable sur Module de commande de broche et de lubrification	Cycle de vie Moyen de coordination Retard copeau (1,k)	Cycle de vie Moyen de coordination
Action	Choix et Développement paramètres de coupe et trajectoires	Durée de formation Copeau (1,k) par arete (1,j) Evacuation copeau (1,k)	Arete de coupe (1,j) et matériau (1,k) à enlever Moyen d'Evacuation copeau (1,k)	Réception arete (1,j) et matériau (1,k) Cycles de vie broche, centrale de lubrification et Moyen d'évacuation Retard Production Mauvais Produit	Durée de formation Copeau (1,k) par arete (1,j) Evacuation copeau (1,k)	Arete de coupe (1,j) suite à usure Consommable Moyen d'Evacuation copeau (1,k)	Maintenance corrective broche et lubrification Cycle de vie Moyen d'évacuation Retard Production Mauvais copeau	Recyclage arete de coupe (1,j) Cycle de vie Moyen d'Evacuation
Préparation des produits	Choix et Développement caractéristiques du système au démarrage	Temps de mise en route broche et lubrification	Motorisation broche et lubrification	Cycles de vie motorisations Retard Production Mauvais copeau	Temps de mise en route broche et lubrification	Consommable sur Motorisation broche et lubrification	Cycle de vie Moyen de réglage Retard Production Mauvais copeau	Cycle de vie Moyen de réglage
Transfert des produits	Choix et Développement de l'activité de Transfert	Temps de Transfert arete (1,j) vers copeau (1,k)	Moyen de Transfert arete (1,j) vers copeau (1,k) (coupe continue ou non)	Cycle de vie Moyen de transfert Retard Production Mauvais copeau	Temps de Transfert arete (1,j) vers copeau (1,k)	Consommable sur Moyen de Transfert arete (1,j) vers copeau (1,k) (coupe continue ou non)	Cycle de vie Moyen de transfert Retard Production Mauvais copeau	Cycle de vie Moyen de transfert
Préparation des ressources	Choix et Développement procédures et implantation du poste de réglage des outils	Durée de Maint préventive ou corrective différée de broche et lubrification Temps de Nettoyage + Réglage arete de coupe (1,j)	Moyen de Maintenance de broche et lubrification Moyen de Nettoyage + Réglage arete de coupe (1,j)	Cycle de vie Moyen de maintenance Cycle de vie Moyen de Nettoyage + Réglage Retard Production Mauvais copeau	Durée de Maint préventive ou corrective différée de broche et lubrification Temps de Nettoyage + Réglage arete de coupe (1,j)	Consommable sur Moyen de Maintenance de broche et lubrification Consommable sur Moyen de Nettoyage + Réglage arete de coupe (1,j)	Cycle de vie Moyen de maintenance Cycle de vie Moyen de Nettoyage + Réglage Retard Production Mauvais copeau	Cycle de vie Moyen de Maintenance
Transfert des ressources	Choix et Développement procédures et implantation du poste de transfert et de montage outils	Temps de Transfert depuis Stocks outils (1,j) Temps de Montage outil (1,j) dans Porte-outil (2,j)	Moyen de Transfert depuis Stocks outil (1,j) Moyen de Montage outil (1,j) dans Pote-outil (2,j)	Cycle de vie Moyen de transfert Cycle de vie Moyen de Montage Retard Production Mauvais copeau	Temps de Transfert depuis Stocks outils (1,j) Temps de Montage outil (1,j) dans Porte-outil (2,j)	Consommable sur Moyen de Transfert depuis Stocks outil (1,j) Consommable Moyen de Montage outil (1,j) dans Pote-outil (2,j)	Cycle de vie Moyen de transfert Cycle de vie Moyen de Montage Retard Production Mauvais copeau	Cycle de vie Moyen de transfert
Surveillance des ressources	Choix et Développement de l'activité de de surveillance	Durée de Surveillance du fonctionnement (broche +lubrification) + usure arete de coupe (1,j)	Moyen de Surveillance du fonctionnement + usure arete de coupe (1,j)	Cycle de vie Moyen de surveillance Retard Production Mauvais copeau	Durée de Surveillance du fonctionnement (broche +lubrification) + usure arete de coupe (1,j)	Consommable sur Moyen de Surveillance du fonctionnement + usure arete de coupe (1,j)	Cycle de vie Moyen de surveillance Retard Production Mauvais copeau	Cycle de vie Moyen de Surveillance
Contrôle des produits	Choix et Développement de l'activité de contrôle	Durée de Contrôle qualité copeau (1,k) délai, fragmentation température	Moyen de Contrôle qualité copeau (1,k) délai, fragmentation température	Cycle de vie Moyen de contrôle Retard Production Mauvais copeau	Durée de Contrôle qualité copeau (1,k) délai, fragmentation température	Consommable sur Moyen de Contrôle qualité copeau (1,k) délai, fragmentation température	Cycle de vie Moyen de contrôle Retard Production Mauvais copeau	Cycle de vie Moyen de Contrôle

Out-flow N1

Annexe D3 : Description instanciée des inducteurs de coûts au niveau 2

Cycle de vie du système	Conception du sous-système	Installation	Formation	Mise en Production	Production	Maintenance corrective	Démontage	Recyclage	
Niveau 2 Porte outil (2,j) /surface (2,k)	INGENIERIE	INVESTISSEMENT			FONCTIONNEMENT			DEMONTAGE	
		DUREE	MATERIELS	ANNEXES	DUREE	MATERIEL	ANNEXES	DUREE	ANNEXES
Coordination	Choix et Développement de la commande d'axes	Temps de traitement d'un bloc et interpolation	Module de commande interpolation et variateurs axes	Cycle de vie Moyen de coordination Retard surface (2,k)	Temps de traitement d'un bloc et interpolation	Consommable sur Module de commande interpolation et variateurs axes	Cycle de vie Moyen de coordination Retard surface (2,k)	Cycle de vie Moyen de coordination	
Action	Choix et Développement de l'opération d'usinage	Durée de transformation surface brute (2,k) par porte-outil (2,j) Temps de retrait Porte-outil (2,j)	Porte-outil (2,j) HSK volume de matière à enlever Moyen de retrait Porte-outil(2,j)	Réception P-O (2,j) et surfaces bruts (2,k) Cycles de vie axes Moyen de retrait Retard Production Mauvaise surface	Durée de transformation surface brute (2,k) par porte-outil (2,j) Temps de retrait Porte-outil (2,j)	Consommable sur Porte-outil (2,j) HSK Consommable sur Moyen de retrait Porte-outil(2,j)	Maintenance corrective axes Cycle de vie Moyen d'évacuation Retard Production Mauvaise surface	Recyclage Porte-outil (2,j) Cycle de vie Moyen d'Evacuation	
Préparation des produits	Choix et Développement changement d'outils	Temps de changement de porte-outil (2,j) pour surface (2,k)	Changeur d'outil	Cycles de vie changeur d'outil Retard Production Mauvaise surface	Temps de changement de porte-outil (2,j) pour surface (2,k)	Consommable sur Changeur d'outil	Cycles de vie changeur d'outil Retard Production Mauvaise surface	Cycle de vie Moyen de réglage	
Transfert des produits	Choix et Développement de l'activité de Transfert	Temps d'approche avant usinage	Motorisation axes en déplacement rapide	Cycle de vie Moyen de transfert Retard Production Mauvaise surface	Temps d'approche avant usinage	Consommable sur Motorisation axes en déplacement rapide	Cycle de vie Moyen de transfert Retard Production Mauvaise surface	Cycle de vie Moyen de transfert	
Préparation des ressources	Choix et Développement procédures et implantation du poste de réglage des P-O	Durée de Maint préventive ou corrective différée des axes Temps de Nettoyage + Réglage +équilibrage +jauge Porte-outil(2,j)	Moyen de Maintenance des axes Moyen de Nettoyage + banc de frettage et équilibrage + mesure des jauges Porte-outil (2,j)	Cycle de vie Moyen de maintenance Cycle de vie Moyen de Nettoyage + Réglage Retard Production Mauvaise surface	Durée de Maint préventive ou corrective différée des axes Temps de Nettoyage + Réglage +équilibrage +jauge Porte-outil(2,j)	Consommable sur Moyen de Maintenance des axes Consommable sur Moyen de Nettoyage + banc de frettage et équilibrage + mesure des jauges Porte-outil(2,j)	Cycle de vie Moyen de maintenance Cycle de vie Moyen de Nettoyage + Réglage Retard Production Mauvaise surface	Cycle de vie Moyen de Maintenance	
Transfert des ressources	Choix et Développement procédures et implantation du poste de transfert des Porte-outils	Temps de Transfert depuis Stocks Porte-outil (2,j) Temps de Montage P-O (2,j) dans magasin d'outil associé à montage (3,j)	Moyen de Transfert depuis Stocks P-O (2,j) Moyen de Montage P-O (2,j) dans magasin P-O	Cycle de vie Moyen de transfert Cycle de vie Moyen de Montage Retard Production Mauvaise surface	Temps de Transfert depuis Stocks Porte-outil (2,j) Temps de Montage P-O (2,j) dans magasin d'outil associé à montage (3,j)	Consommable sur Moyen de Transfert depuis Stocks P-O (2,j) Consommable sur Moyen de Montage P-O (2,j) dans magasin P-O	Cycle de vie Moyen de transfert Cycle de vie Moyen de Montage Retard Production Mauvaise surface	Cycle de vie Moyen de transfert	
Surveillance des ressources	Choix et Développement de l'activité de surveillance des P-O et axes	Durée de Surveillance du fonctionnement des axes + usure et collision P-O (2,j)	Moyen de Surveillance du fonctionnement des axes +usure et collision P-O (2,j)	Cycle de vie Moyen de surveillance Retard Production Mauvaise surface	Durée de Surveillance du fonctionnement des axes + usure et collision P-O (2,j)	Consommable sur Moyen de Surveillance du fonctionnement des axes +usure et collision P-O (2,j)	Cycle de vie Moyen de surveillance Retard Production Mauvaise surface	Cycle de vie Moyen de Surveillance	
Contrôle des produits	Choix et Développement de l'activité de contrôle des surfaces	Durée de Contrôle qualité surface (2,k) (état de surface, dimensionnel et forme) et temps de cycle	Moyen de Contrôle qualité surface (2,k) précision et délai	Cycle de vie Moyen de contrôle Retard Production Mauvaise surface	Durée de Contrôle qualité surface (2,k) (état de surface, dimensionnel et forme) et temps de cycle	Consommable sur Moyen de Contrôle qualité surface (2,k) précision et délai	Cycle de vie Moyen de contrôle Retard Production Mauvaise surface	Cycle de vie Moyen de Contrôle	

Out-flow N2

Annexe D4 : Description instanciée des inducteurs de coûts au niveau 3

Cycle de vie du système	Conception du sous-système	Installation	Formation	Mise en Production	Production	Maintenance corrective	Démontage	Recyclage	
	INGENIERIE	INVESTISSEMENT			FONCTIONNEMENT			DEMONTAGE	
		DUREE	MATERIELS	ANNEXES	DUREE	MATERIEL	ANNEXES	DUREE	ANNEXES
Coordination	Choix et Développement du programme de Commande Num	Temps de traitement des blocs programme	Directeur de Commande Numérique	Cycle de vie Moyen de coordination Retard Pièce (3,k)	Temps de traitement des blocs programme	Consommable sur Directeur de Commande Numérique	Cycle de vie Moyen de coordination Retard Pièce (3,k)	Cycle de vie Moyen de coordination	
Action	Choix et Développement de la sous-phase	Durée de transformation pièce brute (3,k) par montage (3,j) Evacuation Pièce (3,j)	Montage (3,j) Pièce brute (3,k) Moyen de retrait Pièce(3,k)	Réception montage (3,j) pièce brut (3,k) Cycles de vie axes Moyen de retrait Retard Production Mauvaise Pièce	Durée de transformation pièce brute (3,k) par montage (3,j) Evacuation Pièce (3,j)	Consommable sur Montage (3,j) Consommable sur Moyen de retrait Pièce(3,k)	Maintenance corrective montage (3,j) Cycle de vie Moyen d'évacuation Retard Production Mauvaise Pièce	Recyclage montage (3,j) Cycle de vie Moyen d'Evacuation	
Préparation des produits	Choix et Développement changement de pièces	Temps de changement de pièce (3,k) dans montage (3,j)	Moyen de transfert Pièce (3,k) dans Montage(3,j)	Cycles de vie moyen de transfert Retard Production Mauvaise Pièce	Temps de changement de pièce (3,k) dans montage (3,j)	Consommable sur Moyen de transfert Pièce (3,k) dans Montage(3,j)	Cycles de vie moyen de transfert Retard Production Mauvaise Pièce	Cycle de vie Moyen de réglage	
Transfert des produits	Choix et Développement Transfert vers zone d'usinage	Temps de transfert Montage (3,j) vers zone d'usinage	Moyen de transfert Montage (3,j) vers zone d'usinage	Cycle de vie Moyen de transfert Retard Production Mauvaise Pièce	Temps de transfert Montage (3,j) vers zone d'usinage	Consommable sur Moyen de transfert Montage (3,j) vers zone d'usinage	Cycle de vie Moyen de transfert Retard Production Mauvaise Pièce	Cycle de vie Moyen de transfert	
Préparation des ressources	Choix et Développement procédures et implantation du poste de réglage des montages	Durée de Maint préventive ou corrective différée du montage (3,j) Temps de Nettoyage + Réglage montage (3,j)	Moyen de Maintenance du montage (3,j) Moyen de Nettoyage+réglage montage (3,j)	Cycle de vie Moyen de maintenance Cycle de vie Moyen de Nettoyage + Réglage Retard Production Mauvaise Pièce	Durée de Maint préventive ou corrective différée du montage (3,j) Temps de Nettoyage + Réglage montage (3,j)	Consommable sur Moyen de Maintenance du montage (3,j) Consommable sur Moyen de Nettoyage+réglage montage (3,j)	Cycle de vie Moyen de maintenance Cycle de vie Moyen de Nettoyage + Réglage Retard Production Mauvaise Pièce	Cycle de vie Moyen de Maintenance	
Transfert des ressources	Choix et Développement procédures et implantation du poste de transfert des montages	Temps de Transfert depuis Stocks montage (3,j) Temps de Montage du montage (3,j) dans machine (4,j)	Moyen de Transfert depuis Stocks montage (3,j) Moyen de Montage montage (3,j) dans machine (4,j)	Cycle de vie Moyen de transfert Cycle de vie Moyen de Montage Retard Production Mauvaise Pièce	Temps de Transfert depuis Stocks montage (3,j) Temps de Montage du montage (3,j) dans machine (4,j)	Consommable sur Moyen de Transfert depuis Stocks montage (3,j) Consommable sur Moyen de Montage montage (3,j) dans machine (4,k)	Cycle de vie Moyen de transfert Cycle de vie Moyen de Montage Retard Production Mauvaise Pièce	Cycle de vie Moyen de transfert	
Surveillance des ressources	Choix et Développement de l'activité de de surveillance des montages	Durée de Surveillance du fonctionnement + dégradation physique montage (3,j)	Moyen de Surveillance du fonctionnement +dégradation physique montage (3,j)	Cycle de vie Moyen de surveillance Retard Production Mauvaise Pièce	Durée de Surveillance du fonctionnement + dégradation physique montage (3,j)	Consommable sur Moyen de Surveillance du fonctionnement +dégradation physique montage (3,j)	Cycle de vie Moyen de surveillance Retard Production Mauvaise Pièce	Cycle de vie Moyen de Surveillance	
Contrôle des produits	Choix et Développement de l'activité de contrôle des pièces	Durée de Contrôle qualité Pièce (3,k) géométrie et temps de cycle	Moyen de Contrôle qualité pièce (3,k) précision et délai	Cycle de vie Moyen de contrôle Retard Production Mauvaise Pièce	Durée de Contrôle qualité Pièce (3,k) géométrie et temps de cycle	Consommable sur Moyen de Contrôle qualité pièce (3,k) précision et délai	Cycle de vie Moyen de contrôle Retard Production Mauvaise Pièce	Cycle de vie Moyen de Contrôle	

Out-flow N3

Annexe D5 : Description instanciée des inducteurs de coûts au niveau 4

Cycle de vie du système	Conception du sous-système	Installation	Formation	Mise en Production	Production	Maintenance corrective	Démontage	Recyclage	
Niveau 4 Machine (4,j) /Lot (4,k)	INGENIERIE	INVESTISSEMENT			FONCTIONNEMENT			DEMONTAGE	
		DUREE	MATERIELS	ANNEXES	DUREE	MATERIEL	ANNEXES	DUREE	ANNEXES
Coordination	Choix et Développement du lancement des Ordres de fabrication	Temps de lancement des OF	Moyen de lancement des OF	Cycle de vie Moyen de coordination Retard Lot (4,k)	Temps de lancement des OF	Consommable sur Moyen de lancement des OF	Cycle de vie Moyen de coordination Retard Lot (4,k)	Cycle de vie Moyen de coordination	
Action	Choix et Développement de la phase	Durée de transformation lot brut (4,k) par machine (4,j) Evacuation Lot (4,k)	Machine (4,j) Lot brut (4,k) Moyen de retrait Lot (4,k)	Réception machine (4,j) lot brut (4,k) Cycles de vie moyen d'évacuation Retard Production Mauvais Lot	Durée de transformation lot brut (4,k) par machine (4,j) Evacuation Lot (4,k)	Consommable sur Machine (4,j) Consommable sur Moyen de retrait Lot (4,k)	Maintenance corrective machine (4,j) Cycle de vie Moyen d'évacuation Retard Production Mauvais Lot	Recyclage machine (4,j) Cycle de vie Moyen d'Evacuation	
Préparation des produits	Choix et Développement changement de série	Préparation Lot (4,k) et mise en route machine (4,j)	Moyen de préparation Lot (4,k) pour machine (4,j)	Cycles de vie moyen de préparation Retard Production Mauvais Lot	Préparation Lot (4,k) et mise en route machine (4,j)	Consommable sur Moyen de préparation Lot (4,k) pour machine (4,j)	Cycles de vie moyen de transfert Retard Production Mauvais Lot	Cycle de vie Moyen de réglage	
Transfert des produits	Choix et Développement Transfert des lots vers les machines	Temps de transfert Lot (4,k) vers machine (4,j)	Moyen de transfert Lot (4,k) vers machine (4,j)	Cycle de vie Moyen de transfert Retard Production Mauvais Lot	Temps de transfert Lot (4,k) vers machine (4,j)	Consommable sur Moyen de transfert Lot (4,k) vers machine (4,j)	Cycle de vie Moyen de transfert Retard Production Mauvais Lot	Cycle de vie Moyen de transfert	
Préparation des ressources	Choix et Développement procédures et implantation du poste de réglage des machines	Durée de Maint préventive ou corrective différée de la machine (4,j) Temps de Nettoyage + Réglage machine (4,j)	Moyen de Maintenance de la machine (4,j) Moyen de Nettoyage+réglage machine (4,j)	Cycle de vie Moyen de maintenance Cycle de vie Moyen de Nettoyage + Réglage Retard Production Mauvais Lot	Durée de Maint préventive ou corrective différée de la machine (4,j) Temps de Nettoyage + Réglage machine (4,j)	Consommable sur Moyen de Maintenance de la machine (4,j) Consommable sur Moyen de Nettoyage+réglage machine (4,j)	Cycle de vie Moyen de maintenance Cycle de vie Moyen de Nettoyage + Réglage Retard Production Mauvais Lot	Cycle de vie Moyen de Maintenance	
Transfert des ressources	Choix et Développement procédures et implantation du poste de transfert	Temps de Transfert depuis Stocks machine (4,j) Temps de Montage de la machine (4,j) dans l'atelier (5,j)	Moyen de Transfert depuis Stocks machine (4,j) Moyen de Montage machine (4,j) dans atelier (5,j)	Cycle de vie Moyen de transfert Cycle de vie Moyen de Montage Retard Production Mauvais Lot	Temps de Transfert depuis Stocks machine (4,j) Temps de Montage de la machine (4,j) dans l'atelier (5,j)	Consommable sur Moyen de Transfert depuis Stocks machine (4,j) Consommable sur Moyen de Montage machine (4,j) dans atelier (5,j)	Cycle de vie Moyen de transfert Cycle de vie Moyen de Montage Retard Production Mauvais Lot	Cycle de vie Moyen de transfert	
Surveillance des ressources	Choix et Développement de l'activité de de surveillance des machines	Durée de Surveillance du fonctionnement + dégradation physique machine (4,j)	Moyen de Surveillance du fonctionnement +dégradation physique machine (4,j)	Cycle de vie Moyen de surveillance Retard Production Mauvais Lot	Durée de Surveillance du fonctionnement + dégradation physique machine (4,j)	Consommable sur Moyen de Surveillance du fonctionnement +dégradation physique machine (4,j)	Cycle de vie Moyen de surveillance Retard Production Mauvais Lot	Cycle de vie Moyen de Surveillance	
Contrôle des produits	Choix et Développement de l'activité de contrôle des lots	Durée de Contrôle qualité Lot (4,k) conformité et temps de cycle	Moyen de Contrôle qualité Lot (4,k) précision et délai	Cycle de vie Moyen de contrôle Retard Production Mauvais Lot	Durée de Contrôle qualité Lot (4,k) conformité et temps de cycle	Consommable sur Moyen de Contrôle qualité Lot (4,k) précision et délai	Cycle de vie Moyen de contrôle Retard Production Mauvais Lot	Cycle de vie Moyen de Contrôle	

Out-flow N4

